



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Timur Sagitov

**KESKKONNATINGIMUSTE JA TÖÖMEETODITE MÕJU LEICA LASER
TRACKER AT401 TÄPSUSELE**

**THE IMPACT OF ENVIRONMENTAL CHANGES AND MEASURING METHODS ON THE
ACCURACY OF THE LASER TRACKER LEICA AT401**

Magistritöö

Geodeesia õppekava

Juhendaja: dotsent Harli Jürgenson (DSc)

Tartu 2017

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Timur Sagitov		Õppekava: Geodeesia	
Pealkiri: Keskkonnatingimuste ja töömeetodite mõju Leica laser <i>tracker</i> AT401 täpsusele			
Lehekülgi: 60	Jooniseid: 38	Tabeleid: 8	Lisasid: 0
Osakond:	Geomaatika osakond		
Uurimisvaldkond:	geodeesia, <i>laser tracker</i>		
Juhendaja(d):	dotsent Harli Jürgenson		
Kaitsmiskoht ja aasta:	Tartu, 2017		
<p>Väga suur täpsusnõue metallkonstruktsioonide ja tööstusseadmete montaažis, vajadus säästa aega ning vältida tootmiskadusid, sunnib kasutama moodsaid mõõteseadmeid. Üks neist on <i>laser tracker</i> – elektrontahhümeetri sugulane, kuid palju suurema täpsusega. Täpsus on kuni 0,01 mm. Töös tutvustatakse seadet, selle spetsiaalseid kõrgtäpseid reflektorid koos vastava adapteriga. Samuti antakse ülevaade tarkvarast, mis võimaldab luua tootepõhiseid koordinaatsüsteeme ja tulemusi koheselt ekraanil kuvada.</p> <p>Töö eesmärk on uurida <i>laser tracker</i>'i täpsust erinevates ja muutuvates keskkonnatingimustes ning uute meetodite kasutamist töö kiiruse tõstmiseks ilma kvaliteedilanguseta. Nendeks on ühe punkti meetodi ja eelmise päeva koordinaatsüsteemi kasutamine. Töös on uuritud optimaalset valikut suuremate metallkonstruktsioonide mõõdistuse jaoks. Analüüsitud on ka eri tootjate mudelite võimekust. Võrreldakse <i>tracker</i>'it Leica AT401 teiste mudelitega, analüüsides, mis on optimaalne valik. Turul on ka teisi alternatiive, seadmete võimekuse vahe on siiski suur.</p> <p><i>Tracker</i>'i nurkade ning kauguste mõõtmine toimub sarnaselt elektrontahhümeetriga, kui kõrgema täpsusega. Kuna seade ei ole statsionaarne, tuuakse see tihti külmast sooja ruumi. Sama kehtib statiivide kohta. Selliseid keskkonnamõjusid on vähe uuritud, seda lünka püüab see töö täita. Eraldi on analüüsitud <i>tracker</i>'i täpsust, esitatud on objektinäiteid, selgitatud on koordinaatsüsteemi loomist, toodud on ülevaade tarkvarast ja arvutamispriintsiipidest.</p>			
Märksõnad: tööstusgeodeesia, <i>laser tracker</i> , Leica, metroloogia			

Estonian University of Life Sciences		Abstract of Master's Thesis	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Author: Timur Sagitov		Speciality: Geodesy	
Title: The impact of environmental changes and measuring methods on the accuracy of the laser tracker Leica AT401			
Pages: 60	Figures: 38	Tables: 8	Appendixes: 0
Department:	Geomatics		
Field of research:	Geodesy, laser tracker		
Supervisors:	Associate professor Harli Jürgenson		
Place and date:	Tartu, 2017		
<p>Very high accuracy requirements for the assembly of metal structures and industrial equipment and the need to save time and avoid production losses necessitate the use of modern measurement devices. One of these is the laser tracker – a relative of the total station but with a far higher accuracy class of up to 0,01 mm. The Master’s Thesis introduces the device and its special high-precision reflectors, combined with an appropriate adapter. In addition, an overview is given of the software enabling the creation of product-based coordinate systems and instant display of the results on the screen.</p> <p>The objective of the Master’s Thesis is to investigate the accuracy of the laser tracker in diverse and variable environmental conditions. The use of new methods to increase measurement speed without compromising quality is studied. The methods are the one-point method and the previous day coordinate system. The Master’s Thesis explores the optimal choice for the measurement of larger metal structures. As well, the capabilities of models from different producers are analysed. The tracker Leica AT401 is compared with other models to ascertain the optimal option. While there are alternatives on the market, the difference in capabilities between the devices is still great.</p> <p>The tracker measures the angles and distances much like the total station but with higher accuracy. As the device is not stationary, it is often brought from the cold environment into a warm room, as is the tripod. Such environmental effects have been little studied; hence this Master’s Thesis endeavours to fill the gap. The tracker’s accuracy is analysed separately; examples of sites are provided; the creation of the coordinate system is explained; and the software and the calculation principles are outlined.</p>			
Keywords:, indurstrial geodesy, laser tracker, Leica, Metrology			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	6
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE JA SEADMETE ANALÜÜS	8
1.1. <i>Laser tracker</i>	8
1.2. <i>Tracker</i> 'ite kasutusvaldkonnad.....	9
1.3. <i>Tracker</i> 'i täpsust mõjutavad tegurid.....	9
1.4. Erinevate <i>tracker</i> 'ite mudelite võrdlus	10
1.5. Faro Vantage Absoluut- <i>tracker</i> 'i ja Leica AT401 instrumentaalne täpsus	13
1.6. Laserkiire ohutus	14
1.7. <i>Tracker</i> 'i hooldus ja kontroll.....	14
2. TARKVARA ARVUTUSMEETOD JA OBJEKTIDE NÄITED	16
2.1. <i>Tracker Pilot</i> tarkvara	16
2.2. Juhtseadme tarkvara Metrolog X4.....	17
2.2.1. Tasandamise meetodid	18
2.2.2. Prisma asendi vea kompenseerimine	20
2.3. Kahe kompenseerimise meetodi võrdlus	22
2.4. <i>Trackeri</i> poolt kasutatavad koordinaatsüsteemid	24
2.5. Mõõdistatud objektide näited	24
2.5.1. Puidutööstuse Toitev konveier (Powerfeed conveyor)	24
2.5.2. Puurse preventeri sildkraana (Blow-Out Preventer Skid).....	26
2.5.3. Veduri 2TE116 mõõdistus	26
2.5.4. Laeva Mahalaadija nool (Discharge boom)	28
2.5.5. Lubja pöördahi	29
2.5.6. Siemensi baasraam (Siemens base frame)	30
3. KATSED, MEETODID JA TULEMUSED	32
3.1. Temperatuurimuutuse mõju statiivile ja mõõtmistulemustele.....	32
3.1.1. Katse kirjeldus	32
3.1.2. Tulemused	33
3.2. Objekti aukude mõõtmise määramine „ühe punkti meetodiga“	35
3.2.1. Meetodi kirjeldus	35
3.2.2. Katse kirjeldus	36
3.2.3. Tulemused	37
3.3. <i>Tracker</i> 'i soojenemise mõju tulemuste täpsusele	40
3.3.1. Meetodi kirjeldus	40
3.4. Katse kirjeldus	40
3.4.1. Tulemused	43

3.5.	Trackeri eelneva orientatsiooni kasutamine järgmisel päeval	45
3.5.1.	Probleemi ja meetodi kirjeldus	45
4.	KOKKUVÕTE.....	52
5.	SUMMARY	55
6.	KASUTATUD KIRJANDUS	58

SISSEJUHATUS

Täpsete metallkonstruktsioonide mõõdistuseks kasutatakse tänapäeval seadet, mille nimeks on *laser tracker*. See asendab traditsioonilist mõõtmismeetodit ja annab palju uusi võimalusi. Ühelt poolt tõuseb täpsus, objekte on võimalik palju kiiremini kontrollida ja mõõdistada. Teiselt pool saab arvutis luua mudelid, mis annavad uue võimaluse teha lisatöötlust spetsiaalse tarkvara abil. Seade on sarnane elektrontahhümeetriale, aga mõõtetäpsus on oluliselt suurem. Mõõteprintsip on ka sarnane. Lõputöö teema on aktuaalne ja innovatiivne, kuna *laser tracker* on Eestis üsna uus tehnoloogia. *Laser tracker* on tööstusgeodeesia seade, seega elektrontahhümeetri sugulane. Hakkasin tegelema sellega detsembris 2015, kui tekkis soov enda jaoks mõned rakenduslikud asjad selgeks teha, mis võivad firmale kasuks tulla. Eestis on vaid viis *tracker* seadet (neli firmalt Faro ja üks Leica). Siin on käinud mõõdistamas firmad Soomest ja Venemaalt, on kasutatud välismaalt renditud *tracker*'it. Arvan, et tulevikus nende arv kasvab, sest mõõdistused *tracker*'iga on sageli üks tellija nõuetest, selle tagajärjel kasvab metallkonstruktsioonide täpsus. Metallkonstruktsioonide tootmine on Eestis oluline ärisuund, see on tähtis osa riigiekspordist, projekte saab leida väga paljudelt tellijatelt. Just trackeri kasutamine viib metallkonstruktsioonide mõõdistamise täiesti uuele tasemele.

Magistritöö eesmärk on uurida *tracker*'i mõõtmistäpsust muutuvates töökeskkonna tingimustes keset tööstluslikku tootmist, samuti optimeerida mõõtmismeetodeid. Trackeri uuringuid laboritingimustes leidub, aga vähe on leida katseid reaalsetes töötingimustes. See uurimistöö püüab täita seda lünka. Siin on uuritud reaalsete keskkonnaolude mõju *trackeri*-le. Praktikas puutume kokku näiteks olukorraga, kus *tracker* tuuakse külmast sooja ja pole piisavalt aega seadme soojendamiseks. Kuna tihti kasutatakse metallstatiive, on ka need temperatuuritundlikud ja potentsiaalsed vigade allikad. Kõik see võib mõjutada mõõdetavate kõrguste täpsust. *Tracker*'i täpsuse uurimine on muutavas (erinevas) töökeskkonnas väga vajalik, sest tehase spetsifikatsioonijärgne täpsus (mikronide täpsus) on saadud n-ö laboritingimustes. Reaalselt on objektide lubatud tolerantsid muidugi suuremad, sageli on mõõdistamine ka 0,1 mm täpsusega täitsa sobilik. Suurematel objektidel ongi aktsepteeritud suhteliselt suuremad tolerantsid. Siin on ka analüüsitud saavutatud täpsuse sobivust konkreetsete objektide suhtes.

Üheks uurimusülesandeks on mõõta ja analüüsida tulemuse täpsust, kui võetakse kasutusele tööd kiirendavad meetodid. Näiteks varasema orientatsiooni kasutamine järgmisel päeval. Samuti on võrreldud koordinaatsüsteemi loomist nelja ja ühe punkti meetodi abil. Viimane on palju efektiivsem meetod, seda on tutvustatud hiljuti ka seadme loojate poolt. Samas puudub kindlus selle meetodi usaldusväärsuse kohta. Minu uuringu hüpotees on, et mõõtmiste kiirendamisel ühe punkti meetodi abil saab jääda nõutava täpsuse piiridesse paljude objektide mõõdistusel.

Ka on vaadeldud, mis juhtub täpsusega äärmuslikumas olukorras, kui keskkond (näiteks temperatuur) muutub tööprotsessi ajal. Tööstustsehhis on vibratsioon, tolmu, teistsugune atmosfäär (ajutiselt külm õhk, kui väravad lahti ja kuum õhk soojendatud või keevitatud metalli juures).

Lõputöö lisaboonuseks on *laser tracker* tehnoloogia tutvustamine laiemale publikule.

Valdkonnas on ka mõned leviku takistused. Kõigepealt seadme kõrge hind – alates 100 000 eurot. Need, kes vajavad seadet igapäevaselt, on selle ostnud, ülejäänud firmad ostavad teenust. Teiseks probleemiks on asjaolu, et kasutusvaldkonna klientideks on keskmised ja suured ettevõtted. Näiteks geodeesia teenuste tarbijad on tihti väikeettevõtted ja eraisikud. Tendents on see, et Eesti ei ole enam odava tööjõu riik. Et olla konkurentsivõimeline, tuleb toota ja eksportida kõrgtehnoloogilisi seadmeid, kus mõõdistus *tracker*'iga on möödapääsmatu, aga ka mugav.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE JA SEADMETE ANALÜÜS

Üldiselt ei ole *Laser tracker* tehnoloogiast materjali palju leida. Eriti eesti keeles, kus leidub ainult paar artiklit ja minu tehtud presentatsioon. Rohkem informatsiooni saab leida inglise- ja venekeelsetest allikatest. Need on peamiselt uuringud laboritingimustes, siiski leiduvad ka mõned praktilised katsed ja kogemuse kirjeldused. Kasulikud on ka tootjapoolsed infolehed ning kasutusjuhendid.

Erinevates teadusartiklites on kasutatud erinevat tarkvara, siin on toodud informatsioon tarkvara Metrolog X4 kohta ning mõned arvutamispõhimõtted, mida selles programmis kasutatakse. Kasutatud on ka online abimaterjali (Extranet), kuhu on ligipääs ainult nendel, kes on soetanud vastava litsentsi. Käivitades programmi, saab F1 klahviga kätte põhjaliku abifaili erinevate funktsioonidega, ülevaate ja selgitusega. Instrumendiga olid kaasas ka raamatud – üks *tracker*'ist, teine tarkvarast Tracker Pilot.

1.1. *Laser tracker*

Tracker on iseenesest robotiseeritud ülitäpne elektrontahhümeeter, mis mõõdistab ainult ühemehe režiimis (eemaltjuhtimisega) ja ainult reflektorile. Samuti puuduvad suunamiskruvid, piesomootorite süsteem võimaldab sihtida aparati käega või suunata arvutist kasutades pikksilma kaamerat ja virtuaaljuhtkangi. Seadme liigutamine jõuga on kahjulik selle mootoritele sel ajal, kui seade jälgib prismet (on lukustatud prismale). Põhireflekter asub 1,5-tollises metallkeras, mida kasutatakse üksi või koos adapteritega. Kasutada ei tohi teravikke ja vesiloode prismal, mis tuleneb nõutud täpsusest ja objektide iseloomust. (Swisstek 2016)

Laser tracker on leiutatud NISTis ehk USA Riikilikus Standardide ja Tehnoloogia Instituudis 1987. aastal. (NIST). Esimese kommertsmodeli esitas Šveitsi firma Leica 1991. aastal. (Leica 2016). Hetkel tegeleb *tracker*'ite ja tarvikutega Hexagon Manufacturing Intelligence. Rootsi ettveõte Hexagon AB on Leica Geosystems omanik.

1.2.Tracker'ite kasutusvaldkonnad

Järgevalt on toodud mõned levinumad kasutusvaldkonnad (Grishanov & Oinonen) (Petrov):

- Lennu-, kosmose-, auto-, rongi-, laevaehitus;
- mäe-, puidu-, paberi-, tsemenditööstus;
- hüdro-, tuuma-, soojus-, tuuleelektrijaamade ehitus;
- metallkonstruktsioonide tootmine ja montaaž;
- deformatsioonide uurimine;
- astronoomiliste ning militaarobjektide montaaž ja reguleerimine;
- teaduslike rajatiste ehitus ja reguleerimine.

Isiklikult olen kokku puutunud valdkonnaga metallkonstruktsioonide tootmine ja montaaž. Sellest lähtuvalt on siin töös kirjeldatud rohkem seda osa.

1.3.Tracker'i täpsust mõjutavad tegurid

Instrumendist sõltuvad tegurid võib grupeerida järgnevalt (Dvořáček):

- Instrumendi nurgamõõdu ja kaugusmõõduri täpsus;
- ilmajaam kontrolleris – temperatuur ja niiskus, õhurõhk, selle määramise täpsus;
- kõrgtäpsed reflektorid, nende seisukord;
- atmosfääri takistused ja kõikumine – seade ei salvesta mõõdistust, kui kauguse mõõtmiste keskmine ruutviga (edaspidi KRV) on näiteks suurem kui 0,08 mm (oluline on seadmele õigete veapiiride etteandmine, nn apriori vigade seadistamine);
- kohustuslik initialsatsioon – täisvõttega kontrollmõõdistus, veenduda, et aparaat mõõdab nõutud täpsusega. See toimub töö alguses, igas uues jaamas. Seda soovitatakse korrata täpsuse suurendamiseks poole tunni kuni kahe tunni möödudes pärast töö algust.

Instrumendist mittesõltuvad tegurid on järgmised:

- mõõtmismetoodika. Näiteks plaadinurga mõõtmisel ei asetata prisma nurgale teravikuga, vaid mõõdetakse nurgaadapteriga küljed ja nurgad on joonte ristumiskohad;

- tarkvara arvutusmeetodid;
- valitud kindelpunktide arv;
- instrumendi ja kindelpunktide asukoht;
- inimvead – näiteks vale reflektori suurus, liiga suur kiire sisenemisnurk (Kyle, Loser, Warren & Leica), mittesobivad mõõtmiskohad (mustus, deformatsioon).

1.4. Erinevate *tracker*'ite mudelite võrdlus

Maailmas on kolm põhitootjat – Šveitsi firma Leica ning Ameerika firmad FARO ja API. Leica konkurent laserskannerite valdkonnas on FARO, Trimble elektrontahhümeetrite ja Topcon GNSS seadmete osas. *Tracker*'ite alal on Leica konkurentidest oluliselt ees. Ei saa öelda, et Leica seade oleks palju täpsem kui konkurendid, kuid see on mugavam kasutada. V. Petrov võrdles *tracker*'it Leica AT401t FARO mudeliga Vantage ning leidis mitmeid põhjuseid, miks Leica on parem. (Petrov 2015)



Joonis.1.1. Leica AT401 (kuvatõmmis: Leica Geosystems)

Need on mugavuse, tootlikkuse ja ohutuse faktorid. Näiteks kasutab Leica tüüpkinnitusega tavalist treegerit. Saab kasutada erinevaid statiiive kõrgusega alates 0,15 m kuni 1,8–2,1 m. Ja statiiivid pole mitte ainult alumiiniumist, vaid ka puidust (nagu tavaline tahhümeetri statiiv) ja süsinikust. Juhtarvuti ehk kontrolleri on väiksem ja selle kaabel on peenem (segab vähem), Leica seade võib töötada ka ainult akujõul, mida teisel pole. (Petrov 2015)



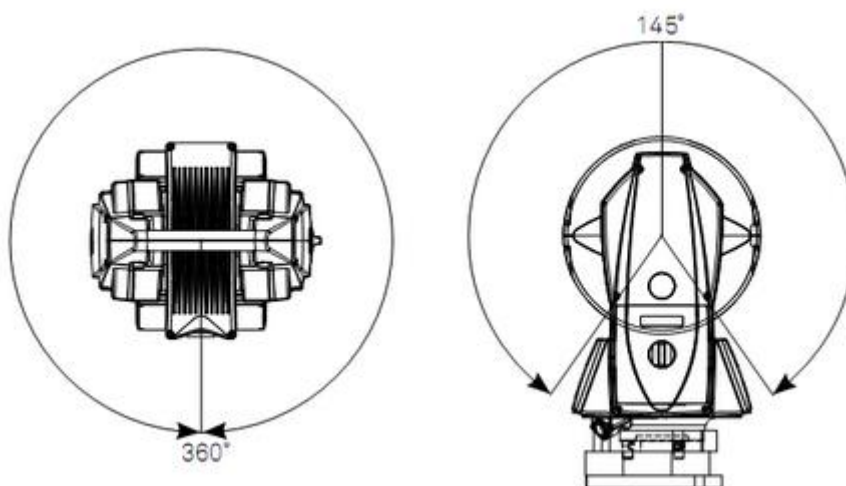
Joonis 1.2. Laser *tracker*'id API Radian, FARO Vantage ja Leica AT960 (kuvatõmmis Engineering.com)

Võrreldes Leica erinevaid mudeleid (400. seeria versus 900. seeria), on 400. seeria *tracker*'il selge eelis. Mõõtekaugus on suurem, on võimalus kasutada erinevaid statiiive: kõrgeid alumiiniumstatiive (1,8 m või 2,1 m) või hoopis väikeseid metallist statiiive (ca 15 cm). Temperatuuri mõju vähendamiseks kasutatakse ka süsinikust ja puidust statiiive (neil on võimalik ka suurem jalgade pikkuste varieerumine). 900. seeria *tracker*'eid on lihtsam liigutada, sest neil on olemas ka ratastega statiiv. Lisaks saavad 900. seeria mudelid töötada koos portatiivse laserskanneriga. (Leica Geosystems)



Joonis 1.3. Leica AT901 (kuvatõmmis: Directindustry.com)

Horisontaalnurga mõõteulatus 360° kraadi ja lõpmatu pööramine on praegu igal kaasaegsel *tracker*'il. Aga ainult Leica 400 seeria *tracker*'il on vertikaalnurk tänu eemaldatavale lingile muudetav seniidist 145° . See on tunduvalt suurem väärtus, kui teiste Leica ja konkurentide mudelitel. See võimaldab teha tööd näiteks kitsas šahtis.



Joonis 1.4. Leica AT401 horisontaal- ja vertikaalnurkade ulatus (kuvatõmmis: Koda.ua)

Leica 1,5-tollised reflektorid on ka mõnest teisest reflektorist paremad. Nende aktsepteerimisnurk on $\pm 30^\circ$, mõnel teisel mudelil aga ainult $\pm 15^\circ$. See tähendab, et prismat

tuleb keerata laseri poole väiksema täpsusega, mis on mugavam ja kiirem. (Kyle, Loser, Warren & Leica)

Siin võib teha veel järeldusi: Integreeritud statiiviga ja rattadega 900. seeria *tracker*'id sobivad hästi näiteks võistlusautode või lennu- ja kopterite osade inspeksiooni jaoks. Muudetava mõõtmiskõrgusega (0,15 kuni 2,1 meetrit) ja 145 kraadisega vertikaalnurga diapasooniga 400. seeria *tracker*'id sobivad hästi suurte metallkonstruktsioonide ehitusse. Sel põhjusel on ka meie firma soetanud selle seadme.

1.5. Faro Vantage Absoluut-*tracker*'i ja Leica AT401 instrumentaalne täpsus

Järgnevas tabelis on toodud põhilised tehnilised anded, mis on kasutajale kõige olulisemad. Kõik täpsuse parameetrid on toodud MPE (Maximal Permitted Error) parameetrites lubatud hälvete piirides. Tüüpväärtused on ½ MPEst. (Hexagon Metrology)

Tabel 1.1. Leica AT401 ja Faro Vantage tehnilised andmed (Leica Geosystems) (FARO)

	Leica AT401	Faro Vantage
Mõõteulatus	Kuni 160m	Kuni 80m
H. nurga ulatus	360°	360°
V. nurga ulatus	±145°	77,9°(+) 52,1°(-)
Täpsus (nurgaline)	±15µm + 6µm/m	±20µm + 5µm/m
Täpsus (ADM) ¹	10µm ²	±16µm + 0,8µm/m
HZ ja VZ täpsus	0,5"	1"
Loodi täpsus	±1"	±2"
Kaamera:	Jah	Jah
Wi-Fi:	Jah	Jah
LAN:	Jah	Jah
220v toide:	Jah	Ei ³
Akutoide:	Jah	Ei
Töötemperatuur:	0°C kuni (+)40°C ⁴	(-)15°C kuni (+)50°C
IP:	IP54	IP52
Lubatud õhuniiskus ⁵ :	95%	95%

Märkus. 1 – ADM – Absolute Distance Meter. 2 – Kogu ulatuses, kui atmosfäär on stabiilne. 3 – FARO Vantage 2017 – Jah. 4 – Leica AT403 2017 – -15°C kuni +45°C nagu eelmine punkt – selle aasta mudel, parameeter tehtud paremaks. 5 – Ilma kondensaadita.

Kõik esitatud hälbed eeldavad 1,5-tolliseid reflektoreid (punaste ringidega Leica 1,5'' RRR) ning mõõtmist mõõtmisrežiimiga 2 sekundit punkti kohta stabiilsetes keskkonnatingimustes. Mõõtmiste täisdiapasoon on 1.5 kuni 80 meetrit *tracker*'ist vertikaalnurkadega +/- 45°. (Hexagon Metrology).

„Uxyz“ on kogu diapasooni ulatuses koordinaatide määramise hälve. „Uxyz“ mõõdistushälve määratakse nagu mõõdetava koordinaadi kõrvalekalle antud punktis nominaalkoordinaadist. Mõõdistuse hälvet näidatakse spetsifikatsioonides sõltuvusfunktsioonina *laser tracker*'i ja mõõdistava punkti vahelise kauguse vahel. (Hexagon Metrology)

Praegu on mudel AT401 asendatud mudeliga AT402, nendel on peaaegu võrdsed näitajad. Mudel 402 võib töötada lisaks portatiivse katsliga (seade on mõeldud varjatud punktide mõõtmiseks, mille korpusel on prisma ja mõõteotsikul kuul). Aastal 2017 esitles Leica uut *tracker*'i mudelit AT403, mille minimaalne töötemperatuur on -15 °C. (Leica Geosystems)

1.6.Laserkiire ohutus

Seadmel on kasutusel 4 laserit: 3 nähtamatut 1. klassi laserit ja üks 2. klassi nähtav laser. Selle laseri puhul ei tohi vaadata otse kiire sisse rohkem kui ¼ sekundit, kui kaugus on alla 8 meetri. (Lasersafetyfacts.com)

Tabel 1.2. Leica AT401 laserite nimekiri (Leica AT401 User Manual)

Laser	Laseri klass
ADM – Absolute Distance Meter	1. klass
ATR – Automatic Target Recognition	1. klass
PowerLock	1. klass
Laser Pointer	2. klass

1.7.Tracker'i hooldus ja kontroll

Aparaadis pole kasutaja poolt hooldatavaid osi. Ainuke asi, mida saab füüsiliselt reguleerida, on vesilood. Kõike ülejäänut saab hooldada vaid sertifitseeritud hoolduses, soovitatavalt kord aastas. Pärast pikka seismist või - pikka transportimist tuleb teha 1 või

enama punkti mõõdistus täisvõttega (*2 face check*), vajadusel korduvalt. Kui see test ei ole läbitud edukalt, tuleb seadet 2 tundi soojendada ja teha uued kompensatsioonid. Lisatesti käigus tuleb võtta teine statiiv ja asetada prisma vastavalt Tracker Pilot käskudele erinevatele kõrgustele ja kaugustele. Kõik ülejäänu toimub hoolduskeskuses, kus on vastav riist- ja tarkvara. (Leica AT401 User Manual) (Tracker Pilot User Manual)

Sensorit ja kontrolleri võib puhastada mitteagressiivse puhastusvahendiga või pinna puhastamiseks mõeldud salvrätikutega. Sensori klaasekraani saab puhastada salvrätikutega või isopropanooliga. Seda piiritust võib kasutada ka reflektorite puhastamiseks. Neid saab pesta ka vedelseebiga. Prisma on seest väga õrn, jõudu või kompressorit ei tohi mitte mingil juhul kasutada. Enne tööd eemaldatakse tolmu vatipulga või õhupirniga. (Leica AT401 User Manual)

2. TARKVARA ARVUTUSMEETOD JA OBJEKTIDE NÄITED

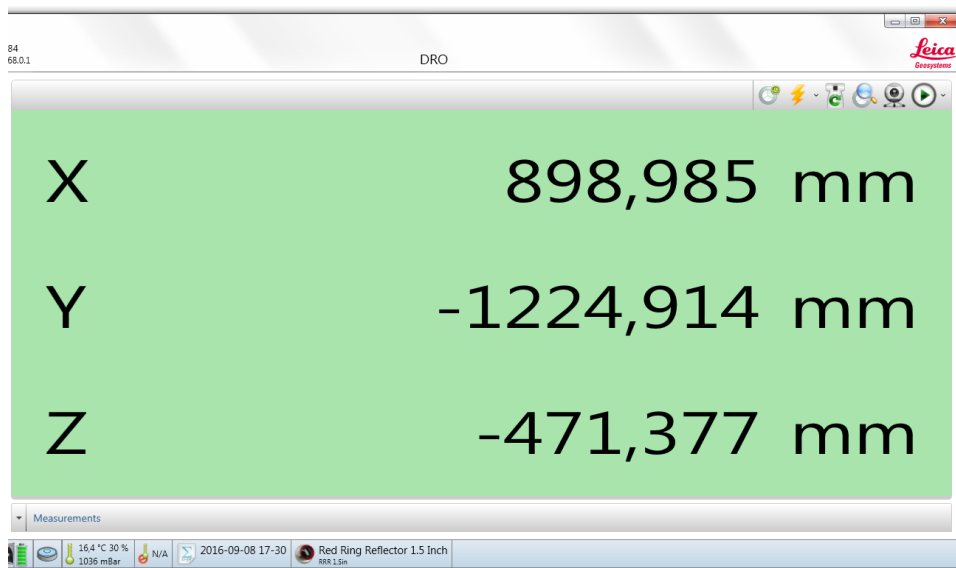
2.1. Tracker Pilot tarkvara

Tracker Pilot on tootjapoolne hooldustarkvara erinevate seadistuste tegemiseks ja kalibreerimiseks. Selle kasutusvaldkonnad on:

- LAN ja Wi-Fi ühenduste haldamine;
- tarkvara värskendused;
- uute reflektorite lisamine;
- *face check* ja nurkade kompensatsioonide arvutus;
- mõõtereziimide aktiveerimine.



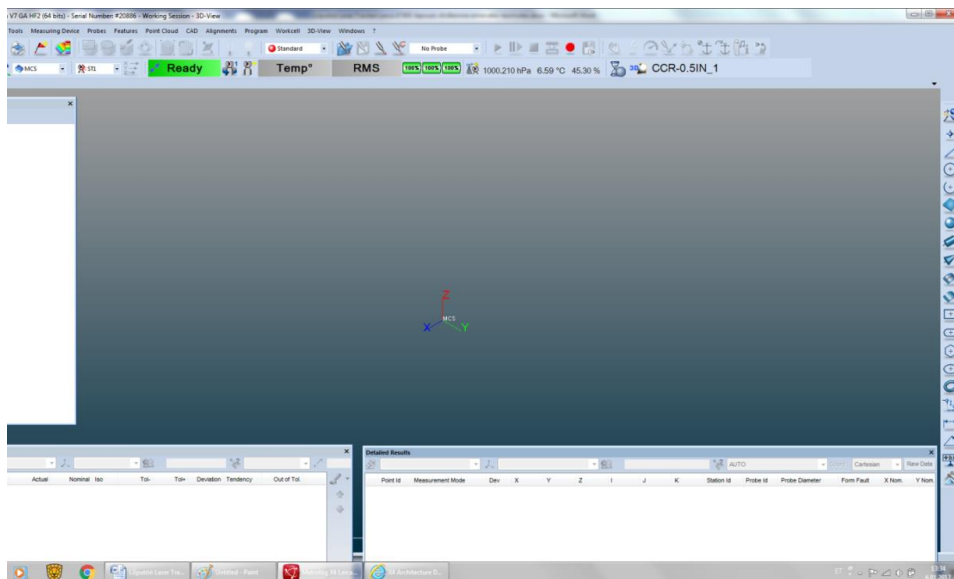
Joonis 2.1b. Seadmete ja ühenduste (LAN ja Wi-Fi) valimine programmis Tracker Pilot



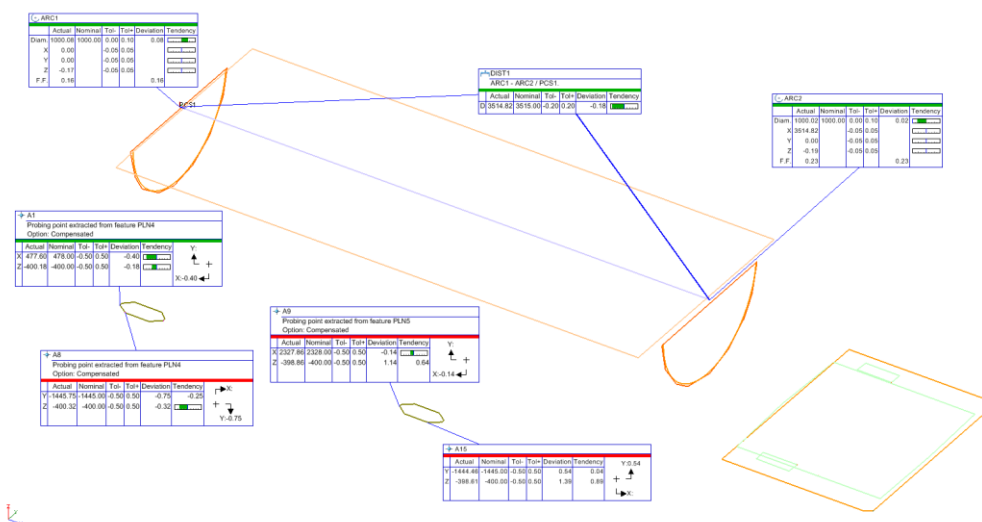
Joonis 2.1b. Tracker Pilot põhiakna vaade

2.2. Juhtseadme tarkvara Metrolog X4

Minu uuringus kasutatud põhiliseks arvutustarkvaraks on Prantsusmaal tehtud Metrolog X4, mis juhib *tracker*'it otseselt tööprotsessis ja teostab andmetöötluse. Tarkvara on paigutaud kontrollerrisse, mis sisuliselt on arvuti.. Seda saab kasutada iga *tracker*'iga, aga ka mõõtkäega või nende kombinatsiooniga. Kasutajaliides on hea ja mugav. Mõõdistades elektrontahhümeetriga salvestuvad mõõtmispunktid esmalt kontrollerrisse, seejärel võetakse üle arvutisse. *Tracker* on pidevalt ühendatud arvutiga, mõõdetavad objektid ja tulemused kuvatakse kohe ekraanile. Paari klikiga saab arvutis näha töödeldud andmeid, mis nõuavad klassikalises geodeetilises tarkvaras tihti andmete ülekandmist ja järeltöötlust.



Joonis 2.2. Metrolog X4 üldvaade ja seadistusaken

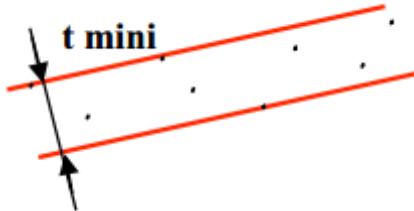


Joonis 2.3. Programmis Metrolog X4 saab informatiivselt näidata objektide suurused ja koordinaadid, tolerantsid, hälbed, kas nad on lubatud piirides ning nende suunad

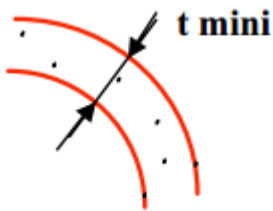
2.2.1. Tasandamise meetodid

Pärast punktide mõõtmist toimub tasandamine kahe erineva meetodiga. Vähimruutude kriteerium minimeerib hälvete ruutude summat, Tšebõševi kriteerium minimeerib detaili vormiviga. Kui Tšebõševi meetod on ainus arvutamiskriteerium objekti hindamiseks (puuduvad teised piirangud), siis püütakse saada $|\text{Min hälve}| = |\text{Max hälve}|$. Programm kasutab vormi vea arvutamiseks vaikumisi vähimruutude meetodit, Tšebõševi meetodiga

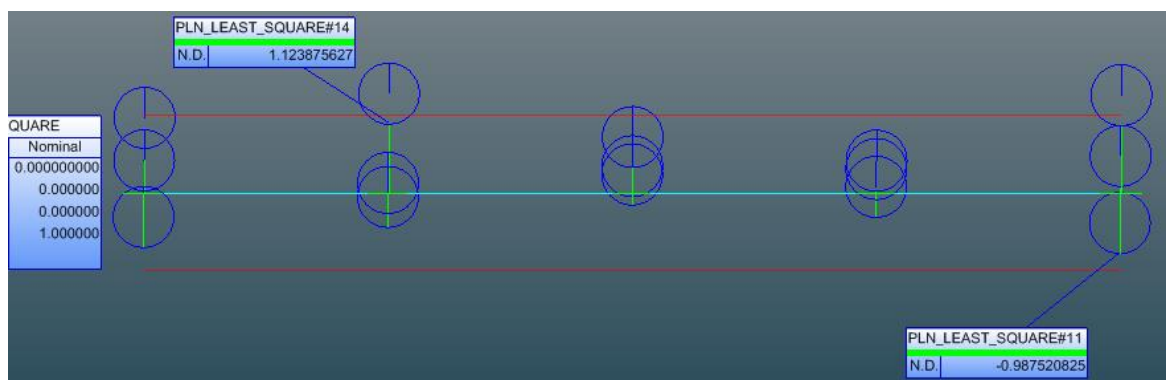
arvutatakse põhiliselt tolerantsid. Erinevus kahe meetodi vahel jääb tavaliselt väiksemaks kui 0,1 mm. Kui võrrelda joonisel 2.6 esitatud väärtusi, siis näeme, et kahel eri meetodil saadud tulemuste erinevus on väga väike, umbes 0,1 mm.



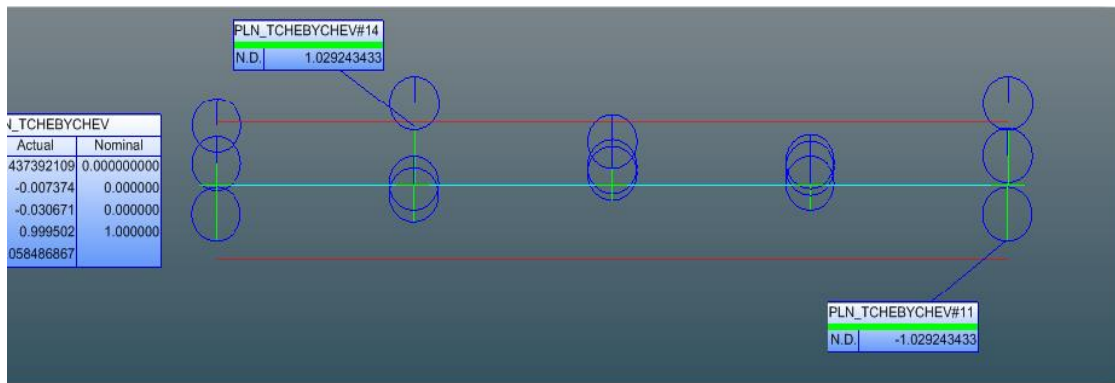
Joonis 2.4. Tšebõševi meetodi korral otsib otsib programm tasapinna jaoks minimaalset kaugust (hälvete summat) kahe tasandi vahel, arvestatakse kõiki mõõdetud punkte (Metrolog Extranet)



Joonis 2.5. Ringi, sfääri, koonuse ja silindri jaoks otsib programm Tšebõševi meetodi abil minimaalset kaugust kahe kontsentrilise detaili vahel, arvutus sisaldab kõiki mõõdetud punkte



a)

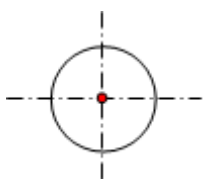


b)

Joonis 2.6. Geomeetrilise lahendi arvutamine a) Vähimruutude meetod, b) Tšebõševi meetod. Erinevus jääb alla 0,1 mm

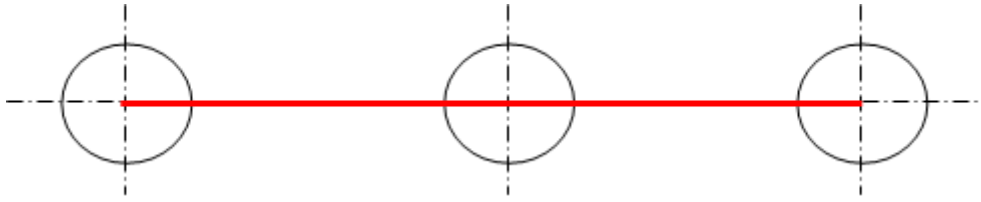
2.2.2. Prisma asendi vea kompenseerimine

Siin on metodoloogiline erinevus tavalise tahhümeetriga, kus punkti asendi leidmiseks liidetakse prisma konstant (kui ta on olemas) ja lahutatakse prisma kõrgus. *Tracker*'i ja selle tarkvara üks märkimisväärseid plusse on asjaolu, et detailide mõõtmine toimub sõltumata nende horisondi olekust. Mõõteandmed saadakse laserkiire abi, esmalt mõõdab laser kuuli keskele.



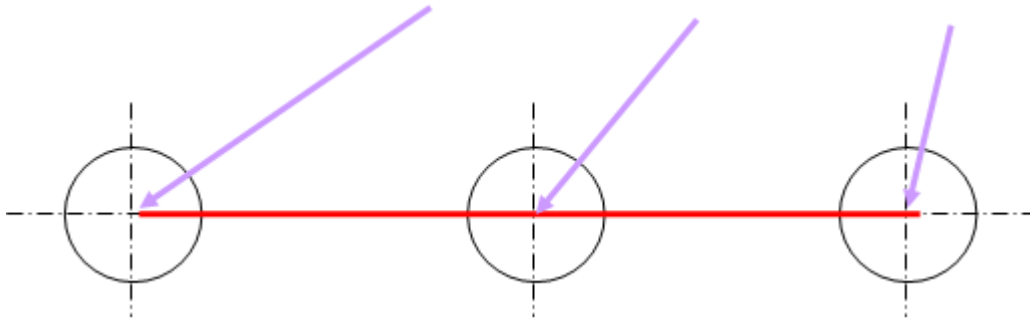
Joonis 2.7. Laser (või ka mõõtekäsi) mõõdab reflektori keskkoha

Kõigepealt laser (või ka mõõtekäsi) mõõdab reflektori keskkoha. Siis ta konstrueerib geomeetrilise kujundi (antund juhul tasapind), lähtudes kolmest keskkohast. Näitena on toodud tasandi loomine kolmest punktist.



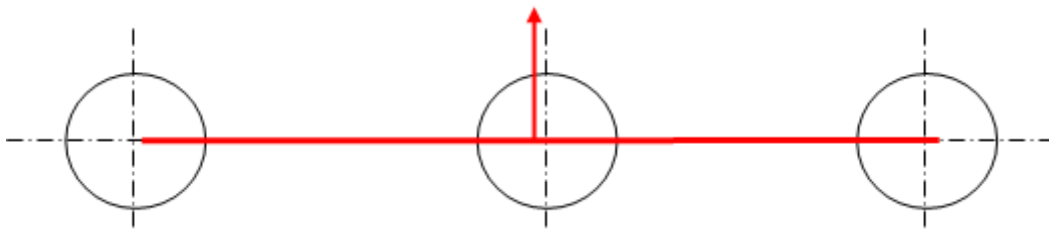
Joonis 2.8. Detaili konstrueerimine, tasapind on loodud kolmest punktist (Metrolog Extranet)

Kui on mõõdetud reflektori keskele, siis tuleb neid andmeid kompenseerida. Vastavalt valitud kompenseerimisrežiimile arvutab Metrolog detailile orientatsiooni. Joonisel 2.9 on toodud mõned võimalikud kiire suunad. Suuna annab laserkiir (lillat värvi nool)

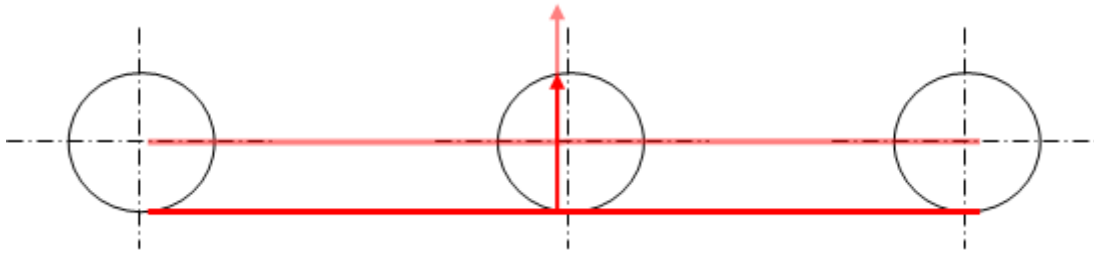


Joonis 2.9. Detaili asendi kompenseerimise suunad

Vastavalt mõõtesuunale saab tarkvara Metrolog arvutada detaili suuna (punane nool tähistab tasandi orientatsiooni, Joonis 2.10. Lõpuks saab Metrolog kompenseerida prisma (või katsli) raadiust õiges suunas (Joonis 2.10, Metrolog Extranet)



Joonis 2.10. Detaili suuna määramine tarkvaras



Joonis 2.11. Prisma või kantsli raadiuse lõplik kompenseerimine. Siin on näha joonte erinevus

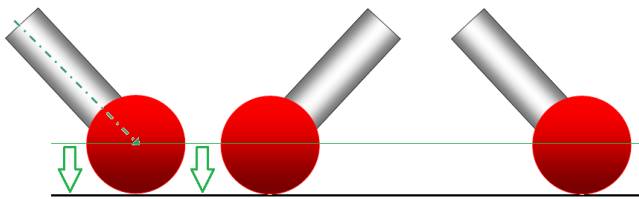
Kui on soov muuta kompenseerimissuunda, saab seda teha vajutades \$- nuppu puldil. Sisemist või välimist diameetrit saab määrata kahte moodi: mõõdistada aparaadi poole või teises suunas. Sisuliselt on tegemist nihke parandiga. Võib ka lihtsalt valida, kumb diameeter on „*inner*“ või „*outer*“. Siis tarkvara, konstrueerides diameetri, liidab või lahutab prisma või adapteri raadiuse.

2.3.Kahe kompenseerimise meetodi võrdlus

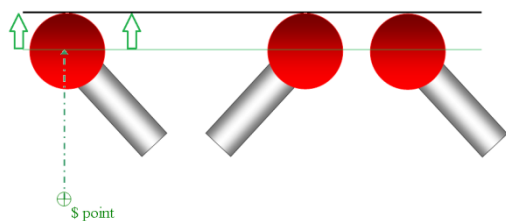
Järgnevalt on esitatud kahe kompenseerimise meetodi erinevus. Võrreldud on võlli suunaga ja dollar punkti suunaga kompenseerimist. Võlli meetodit kasutakse eeskätt mõõtmiskäega mõõtmisel, osaliselt siiski ka *tracker*'i-ga mõõtmisel, eriti kui kasutakse katsel b-probe. Instrument mõõdistab prisma katsli korpusel, kaugus otsikuni on teada. Kompensatsioonisuuna annab võll, mille otsikul on mõõdistuskuul. Kuna *tracker* iseennast teeb mõõtmisi laserkiire abil, siis kasutakse \$-punkti meetod. Algul asub see punkt aparaadi sees, vajadusel saab muuta kohapeal või kameraaltöodes.



Joonis 2.12. Prisma RRR 1.5" (D – 38.10 mm) ja RRR 1.5" koos adapteriga (D – 50.00 mm)



Joonis 2.13. Võlli suunaga kompenseerimine



Joonis 2.14. Dollar-punkti suunaga kompenseerimine

2.4. Trackeri poolt kasutatavad koordinaatsüsteemid

Võrreldes tavageodeesiaga ei kasutata siin riigi või kohaliku koordinaatsüsteemi.

Kasutatakse nelja sorti koordinaatsüsteeme. Nendeks on:

- Suvaline süsteem – ei jälgi koordinaate. Kasutusel on diameetrid ja nendevahelised kaugused;
- X, Y – suvalised koordinaadid, jälgitakse ka Z-i, mõni punkt võetakse 0-iks. Seda kasutatakse toote horisonti panemisel ja toote vundamendi märkimisel;
- Tootepõhine koordinaatsüsteem. Toote elemendid – tasapinnad, jooned (servad või jooned aukude vahel aitavad koostada koordinaatsüsteemi,
- 3D-mudeli kasutamine. Mudeli saab panna kas niisama referentsiks tarkvaras, et joonis oleks hästi arusaadav. Aga koordinaatsüsteemi võib teha ka mudeli järgi.

Tavaliselt ma ei kasuta 3D mudelit. Diameetrid või kaugused kontrollitakse ilma koordinaatsüsteemita, keerulisemate objektide puhul teen koordinaatsüsteemi objekti põhjal. Olen 3D mudeli loomiseks pidanud nõu tehnoloogiga, projekti juhiga, meistriga, brigadiriga ja töötajaga, et saada kõiki rahuldav tulemus.

2.5.Mõõdistatud objektide näited

2.5.1. Puidutööstuse Toitev konveier (Powerfeed conveyor)

Toitekonveieri ülesanne on palkide toimetamine lindi abil koorimistruumi. 2016. aastal tegime puidutööstuse jaoks 7 konveierikomplekti. Tellijaks oli tuntud Austria kontsern Andritz. Igas komplektis oli ketta-, mahalaadimis- ja toitekonveier. See koosneb mitmest sektsioonist, viimane sektsioon on kujutatud pildil. Viimase sektsiooni lõpuosas paiknevad koonus ja flanš (äärik), mida tuli mõõdistada *tracker*'iga.

Konveierite suurused olid veidi erinevad, kuid kõigi kõrgus oli umbes 6 meetrit. See tähendas, et kõige ülemise punkti mõõdistus ja mahanähtamine tehti käärtootukilt. Seetõttu oli aeg-ajalt vaja abilist, kes vajutaks puldil mõõtmisnuppu. Objekt ei vajanud tingimata kõrgtäpset mõõdistust, kuid *tracker*'i kasutamise tingis toote suurus ja kuju. Kaks konveierit pidid minema Venemaale rongiga, seetõttu olid mõned nende osad kokku keevitamata.



Joonis 2.15. Toitev konveier

- Koordinaatsüsteemi loomiseks kasutatud elemendid:
- Z – keha t-profiili nurgad;
- X – keskmise t-profiili keskjoon;
- X0 – keskmise t-profiili algus;
- Y0 – X-telg;
- Z0 – Z-tasand.

Tööde käigus kontrolliti järgmisi elemente

- koonuse 4 lõikepunkti mahamärkimine;
- lõigatud serva kontroll – 8 punkti järgi;
- flanši asukoha kontroll (X-koordinaadid ja nurk) enne keevitust. Kontrolli jaoks mõõdistati sisemine ja välimine ring;
- flanši asukoha kontroll toimus pärast keevitust. Mõõdeti ka mõlemad diameetrid. Kauguste mõõtmine toimus õmblusteni (koonus ja keha), kus X0 on flanši keskpunkt.

2.5.2. Puurse preventeri sildkraana (Blow-Out Preventer Skid)



Joonis 2.16. BOP Skid – sildkraana naftplatvormil, liigutab puuraugu sulgemiselemente

Koordinaatsüsteemi loomiseks on kasutatud järgmisi elemente:

- Z – masindatud pinnad alt;
- X, Y – masinaga tehtud augud nendel pindadel, jooned nende vahel;
- sisemised raamid (keskmine ja väike) – masindatud augud.

Tööde käigus kontrolliti täpsust järgmistel elementidel:

- Hülsside asukoha kontroll;
- Kaugus erinevate pindadeni;
- Keskmiste ja väikeste raamide puhul viidi läbi geomeetria ja pindade töötlemisvaru kontroll.

2.5.3. Veduri 2TE116 mõõdistus

See oli huvitav töö, kuna pakkus uue väljakutse – esimene töö reaalselt juba kasutuses oleva objektiga ja esimene töö väljaspool ettevõtet. Tellijaks oli AS E.R.S. – Eesti suurim eraraudteefirma. Käisin objekti mõõdistamas kaks korda. Esimesel korral mõõdistasin vedurivankrit liivapritsimise ettevõttes, teisel korral mõõdistasin juba vedurit tellija depoo. Tänu kohapeal olnud tellija esindajatele sain teada lähteülesande, mille põhjal oli koordinaatsüsteemi loomine kergem.



Joonis 2.17. Vedur 2TE116

Koordinaatsüsteemi loomiseks on kasutatud järgmisi vankri elemente:

- Z – rataste kinnitustkohtade keskmine tasand – alumine tala;
- X – rataste kinnituskohtade keskmised jooned.

Kontrollida oli vaja täpsust järgmistel osadel:

- teljepoldi osa deformatsioonide kontroll;
- rattabaasi koaksiaalsus.
- Koordinaatsüsteemi loomiseks kasutatud veduri põhja elemendid: X – esi- ja tagateljepoltide diameetrite vaheline joon;
- Z –instrumendi horisont
- põhja tasapinnalisuse kontroll;
- esi- ja tagahaage koaksiaalsuse kontroll peapoldi suhtes.

2.5.4. Laeva Mahalaadija nool (Discharge boom)

Aastatel 2016–2017 tegime 2 sellist toodet. Tellijaks oli Kanada kontsern EMS-Tech. Iga nool koosnes kolmest sektsioonist ja nende üldpikkus oli u 80 m. See on lindiga sadama mehhanism, mis võimaldab kiiresti ja ühtlaselt laadida puistekaupu laeva laadungiruumi.

See objekt oli mitmel põhjusel üks raskemaid. Esiteks oli keeruline koostada koordinaatsüsteemi, kuna selle jaoks tuli mõõdistada väga paljusid kohti baastorudel. Teiseks probleemiks oli objekti suurus, kuna liikumine ühest kohast teise võttis palju aega. Kui objektil on juba palju lisaelemente (erinevad flanšid, torud ja galeriid), siis on nähtavus üsna piiratud ja paratamatult suureneb jaamade arv.



Joonis 2.18. Mahalaadija nool (1 sektsioon) (Foto autor: M.Koževnikov)

Koordinaatsüsteemi loomiseks kasutatud elemendid on järgmised:

- Z – baastorude üldtasand;
- X – baastorude keskmine joon (torusid mõõdetakse silindritena);
- X0 – flanšid.

Kontrolliti gabariite, nede pikkust ja laiust, nii sektsioonide kaupa kui ka üldiselt. Viidi läbi ka flanšide õigete kallete montaaž ja tasapinnalisuse kontroll. Flanšid olid masindatud, pärast panime neid välja kaldega 7,6° loodjoonest. Pärast keevitust kontrollisin, et nende kahe flanšide tasapinnalisus ei ületaks 0,3 mm. Mõned kohad oli vaja natukene lihvida. Koordinaatsüsteemi loomiseks kasutatud elemendid on järgmised:

- Z –instrumendi horisont;
- X, Y – puuduvad.

2.5.5. Lubja pöördahi

See on 2015–2016 aastate toode, mis koosneb 60 sektsioonist ja mille üldpikkus on u 160 meetrit. Tellijaks oli Soome kontserni Valmet Rootsi osakond.

Vaatamata sellele, et tegemist on suure objektiga, olid täpsusnõuded tõsised. Seade põletab lupja ning osa sellest pöörleb. See tähendab, et toode peab olema suurepärase temperatuuritaluvusega ja heade geomeetriliste parameetritega, eriti bandaažiga sektsioonides. Halb koaksiaalsus põhjustab bandaažide ja tugirullikute kiiremat kuluvust ja kõrgendatud energiakulu. Näiteks oli bandaažsektsiooni raadiuste täpsus ± 2 mm.

Sektsioonide diameetrid olid 5,5 meetrit. Väljastpoolt oli seadet võimalik mõõdistada 3 jaamast. Kui toode paiknes tsehhi kitsastes nurkades, oli kindelpunktide paigutamine (rippuv käik on võimatu) aeg-ajalt keeruline. Samuti raskendas mõõdistamist kõrge lõpposa (nähtav pildil). Mõõdistama pidi platvormilt, mida tuli pidevalt liigutada. Instrument tuli paigutada konsoolile ning veenduda, et inimtegevus sellel alal ei sega aparadi stabiilsust. See tekitas omakorda ajakulu. Igaks juhuks piirasin *tracker*'i ümber ohutuslindiga.



Joonis 2.19. Lubja pöördahi (Foto autor: V. Shvedchikov)

Viidi läbi mõne kesta raadiuste kontroll rihtimiseks. Koordinaatsüsteemi loomiseks kasutatud element oli kest mõõdetud silindrina.

Lisaks kontrolliti järgmisi osi:

- Bandaažkestade kontroll – kesta ja sideraudade koaksiaalsus. Koordinaatsüsteemi loomiseks kasutatud elemendid:
- Z – masindatud ümmargune flanši tasapind;
- X0, Y0, Z0 – flanši ringi keskkoh.

Veel kontrolliti viskumist flanši suhtes. Seal on olemas kaks lõppsegmenti: flanš + koonus + kest.

2.5.6. Siemensi baasraam (Siemens base frame)

See oli keeruline projekt, mille tellijaks oli Saksa kontsern Siemens, kõige suuremad raamid läksid Hiinasse. Ühe aasta jooksul (2016–2017) tegime 8 sellist raami. Need raamid on elektrimootorite kestad erineva suurusega – u 3,5; 4,5 ja 5,5 meetrit. Nende üldkonstruktsioon oli enamvähem sama, lisadeks olid erinevad kastid, pealisehitised, plaadid ja flanšid.

Enne masindamist on mõõtmistäpsus u 1 mm, pärast masindamist kuni 0,1 mm masindatud osade jaoks ja 0,3–0,5 mm lisadetalide jaoks. Kaeluste diameeter on näiteks 1000 mm - 0/+0,1 mm – see tähendab, et selle suuruse kontrollimiseks tuleb mõnikord mõõdistada mitu korda, veendumaks, et pinnad on puhtad, soojendada instrumenti u pool tundi ja lubada väiksem mõõtmiste KRV. Tuleb arvestada ka sellega, et mõõdistustsehhi tingimused erinevad masindamistsehhi omadest. Sisetreipingi mõõtmistulemused on muidu usaldusväärsemad, aga kui tegemist on juhtumisi jämeda veaga, on see *tracker*'iga hästi avastatav.

Üldjuhul on toote suurus ja gabariidid mõõdistamiseks mugavad. Tööd saab teha mugavas asendis ja tavaliselt kahest jaamast. Iga raami mõõdetakse mitu korda – enne keevitust, pärast keevitust ja pärast termotöötlust (juhul kui seda tehakse). Pärast esimest masindamist pannakse välja küljeflanšid ja muud pealisehitised. Vajadusel toimub teine masindamine nagu kaaneflanšide jaoks.



Joonis 2.20. Siemens baasraam (Base Frame)

Koordinaatsüsteemi loomiseks kasutatud elemendid on järgmised:

- Z – ülemiste pindade üldtasand
- X – joon kahe kaeluse keskkohdade vahel
- X0 – 1 kaelus
- Y0 – X-joon
- Z0 – Z-tasand

Mõõtmiste eesmärk oli kontrollida gabariite erinevatel sammudel ja välja pandud lisadetaile.

3. KATSED, MEETODID JA TULEMUSED

3.1. Temperatuurimuutuse mõju statiivile ja mõõtmistulemustele

On üldteada, et enamik metalle on temperatuuritundlikud. See muutub oluliseks kõrgtäpsuses mõõtmistes. Geodeesiast võib tuua näite nivelleerimisest. I klassi nivelleerimiseks kasutatakse invarlatte just sellel eesmärgil, et vähendada temperatuuri mõju. Seal võtab nivelliir lugemi resolutsiooniga 0,01 mm, sama täpsusklass on ka siin. Vladimir Petrov kirjutab, et 5° C temperatuurimuutusega muutub ka alumiiniumist statiivi kõrgus 0,23 mm võrra (Petrov 2015). Tegin katseid, et näha, kuidas see mõjub mõõtmiste tulemustele ning et kas sellega peab arvestama.

Valisin tsehhi, kus asuvad suured töötluspingid. Võrreldes tavalise tsehhiga on seal enam-vähem stabiilne temperatuur (12-13 °C), puudub tolmu, ei lihvita ja väga harva töötab kuni 1 keevitaja (mitte 10). Seega välismõjud tulemustele on seal viidud miinimumi. Kasutasin alumiiniumist originaalstatiivi, mis oli täiskõrgusel (1,8 m). Kõigepealt oli see õues pooleldi lumes ja õhutemperatuur oli – 4 °C. Selline temperatuur võib esineda ka tavaelus, kui statiivi hoida näiteks külmas laos või auto pagasiruumis. Mõõdistus võib aga toimuda hoopis soojas tsehhis. Ülesandeks on uurida, kuidas mõjutab temperatuuri muutus statiivi ja selle kaudu tulemusi. Kas sellest tekib kõrguse muutus punktide koordinaatidele? Eriti tundlik on Z-koordinaat, aga ka X ja Y koordinaat ja mis saab punktide omavahelistest kaugustest.

3.1.1. Katse kirjeldus

Muutuse võimalikuks tuvastamiseks on mõõdetud metallraamil asuvad punktid mitu korda kindla intervalliga. Joonisel 3.1 on näha mõõtmisala. Mõõdistamispunktid asuvad raamil üksteisest umbes 1–2 meetri kaugusel ja kaugus instrumendini on 8 meetrit. Raamile on kinnitatud kindelpunktide pesad magnetiga, milles asuvad prismad (vaata joonis 3.8). Külma statiiv on toodud õuest otse tsehhi, mõõdistasin ilma seda soojendamata „fast“ režiimis. Et jälgida võimalikku koordinaatide muutust, on mõõdistatud viite erinevat punkti kahe tunni jooksul pausidega 15 minutit.

3.1.2. Tulemused



Joonis 3.1. Kontrollpunktide mõõtmine *tracker*'iga soojenevalt statiivilt

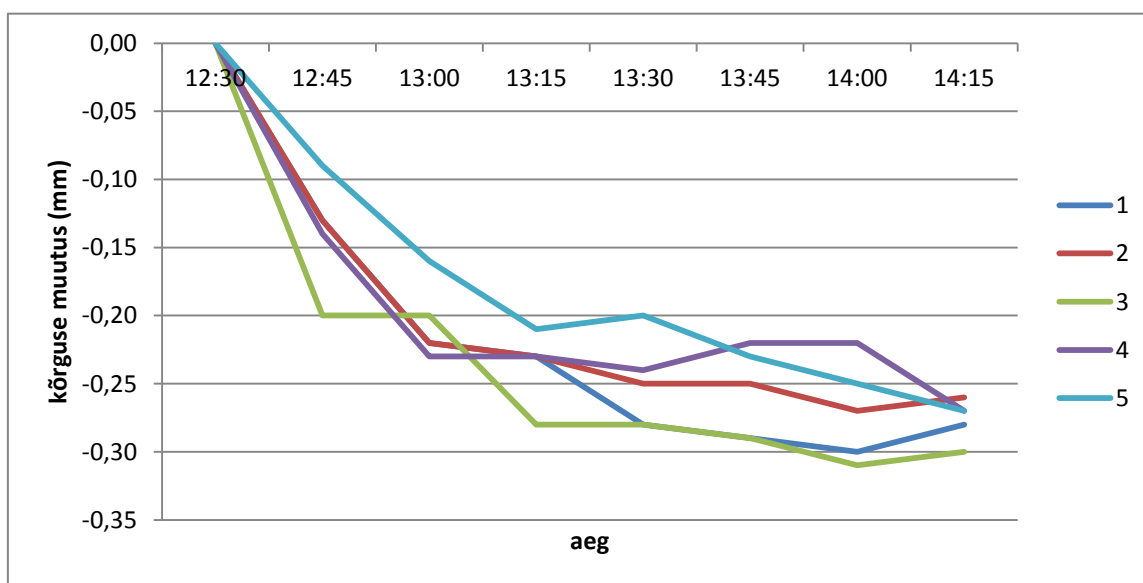
Tabelites 3.1a. ja 3.1b. on viie kontrollpunkti kõrguste ja nendevaheliste kauguste muutus. Tulemusi võrreldakse esimese mõõdistusega kell 12.30, selle veeru väärtused on 0,00.

Tabel 3.1a. Objekti kõrguste muutus seos statiivi temperatuuri muutusega. Ühikud on mm

	Aeg	12:30	12:45	13:00	13:15	13:30	13:45	14:00	14:15
Hälve	Nr								
Z	1	0,00	-0,13	-0,22	-0,23	-0,28	-0,29	-0,30	-0,28
Z	2	0,00	-0,13	-0,22	-0,23	-0,25	-0,25	-0,27	-0,26
Z	3	0,00	-0,20	-0,20	-0,28	-0,28	-0,29	-0,31	-0,30
Z	4	0,00	-0,14	-0,23	-0,23	-0,24	-0,22	-0,22	-0,27
Z	5	0,00	-0,09	-0,16	-0,21	-0,20	-0,23	-0,25	-0,27

Tabel 3.1b. Sihtpunktide omavaheliste kauguste muutus seos statiivi temperatuuri muutusega. Ühikud on mm

	Aeg	12:30	12:45	13:00	13:15	13:30	13:45	14:00	14:15
Hälve	Nr								
D	1 2	0,00	0,01	0,03	0,01	0,03	0,02	0,02	0,03
D	2 3	0,00	-0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,00	-0,01
D	3 4	0,00	-0,02	-0,03	-0,03	-0,07	-0,05	-0,03	-0,06
D	4 5	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
D	5 1	0,00	0,06	0,00	0,06	0,13	0,08	0,08	0,07



Joonis 3.2. Kontrollpunktide kõrguse muutus seoses temperatuuri mõjuga statiivile

Joonisel 3.2 on esitatud punktide kõrguste muutus 2 tunni jooksul. Graafikult näeme, et punktide kõrgus väheneb ajas, kuna soojenedes muutub statiiv kõrgemaks. Esimese poole tunni jooksul muutub kõrgus ca 0,2 mm, ülejäänud pooleteise tunniga ca 0,1 mm. Kokku on muutus seega kuni 0,3 mm. Seega saame järeldada, et esimese 50 minuti jooksul on

statiivi soojenemine selge vigade allikas, millega tuleks arvestada. Paljudel juhtudel tuleb arvestada alumiiniumstatiivi omadusi, eriti kui tegemist on kõrgtäpse mõõdistusega ja instrument asub kaua ühel jaamal. Ettepanekuna võib mainida, et võimalik on kasutada süsinikust ja puidust statiive, millede temperatuuritundlikus on kindlasti väiksem. Tehase poolt antakse kaasa siiski metallstatiiv. Ilmselt on põhjus selle statiivi kasutamise mugavuses.

Teiseks on vaadeldud ka võimalikke horisontaalseid nihkeid. Tabelist 3.1b näeme, et punktidevaheliste kauguste erinevused on väikesed, põhiliselt samas suurusjärgus mõõtmiste täpsusega. See on ilmselt tingitud sellest, et statiiv paisub ühtlaselt ja eeskätt vertikaalsuunas.

Nagu varem mainitud, võib selline temperatuuri vahe tekkida kergesti tavalise elu juures, näiteks kui statiivi on hoitud terve öö auto pagasiruumis ja hommikul on hakatud seda kohe soojas ruumis mõõdistamiseks kasutama. Seega peab statiivi eelnevalt laskma kohaneda mõõdistusruumi temperatuuriga.

3.2. Objekti aukude mõõtmete määramine „ühe punkti meetodiga“

3.2.1. Meetodi kirjeldus

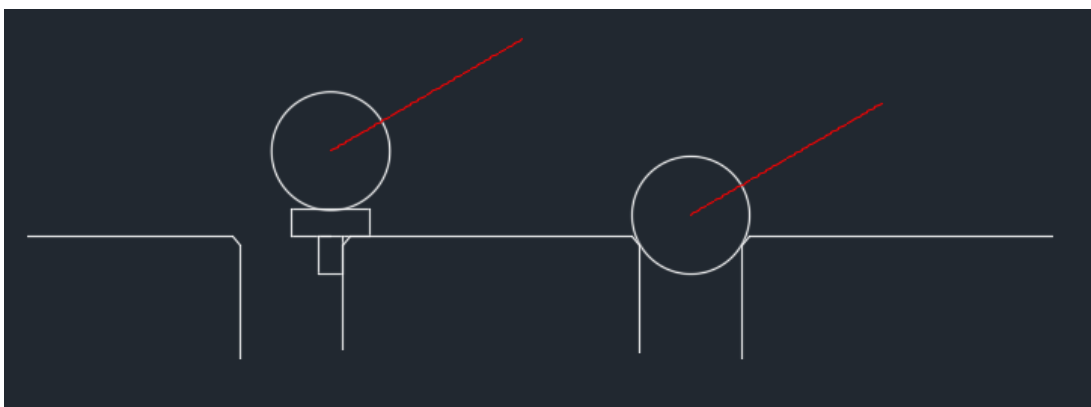
Tavaliselt mõõdistatakse detailide väiksemaid auke *tracker*'iga eesmärgiga luua nende põhjal koordinaatsüsteem. Seda saab teha kas nelja või ühe punkti meetodiga. Pärast koordinaatsüsteemi loomist saab kontrollida aukude asendit objektil.

2016. aastal Hexagon koolitusel tutvustati ühe punkti meetodit, mis on selgelt efektiivsem. Siiski tekib küsimus selle meetodi usaldusväärsusest. Seni on rohkem kasutatud nelja punkti meetodit, mis on aga aeganõudvam ja ebamugavam. Ebamugav on just prisma hoidmine. Kuna 1 punkti meetod on kiirem, siis uuritakse siin, kui täpne see meetod on. Eesmärk on edaspidi kasutada seda eelismeetodina.

Augu keskkoha määramiseks saab seega kasutada klassikalist 4 punkti meetodit või moodsamat 1 punkti meetodit. Joonisel 3.3 on toodud vasakul n-ö klassikaline 4 punkti meetod. Kõigepealt mõõdetakse referentstasand, pärast ring vähemalt 3 punktiga. Kui

punkte on rohkem, siis tarkvara arvutab parima diameetri ja tsentri asukoha. Kõige suuremate hälvete + ja – summa on vormi viga (*form fault*).

Paremal (joonis 3.3) on esitatud 1 punkti meetod. Sel juhul mõõdetakse referentstasand, siis läheb ringi sisse reflektor. Kuna selle diameeter on täpselt määratud, siis tarkvara saab arvutada selle sügavuse tasandi suhtes. Prisma ja augu keskkoha määramine pole probleem, sest prisma konstant on 0.



Joonis 3.3. Nelja- ja ühe punkti meetodi põhimõtteline võrdlus

3.2.2. Katse kirjeldus

Katse toimus tsehhis, kus mahalaadija noole otsal oli 2 masindatud kaheksanurgalist ühendusflanšši (joonis 3.4). Nende suurus on 750x600x65 mm, kaugus teljest teljeni 3690 mm. Igal flanšil on 16 auku diameetriga 33 mm. Mõõdistasin mõned augud mõlema meetodiga, et saada koordinaatsüsteemide täpsuse võrdlus. Kontrolliks mõõdistasin ka kaks ülemist flanšši, täpsemalt öeldes nende välimise diameetri, et saada keskkoha koordinaadid. Need peavad olema enam-vähem samad, sõltumata kasutatud koordinaatsüsteemist. Teiseks oli huvitav võrrelda ka aukude diameetreid. Aukude diameeter on ühe punkti meetodi puhul piiratud prisma diameetriga, mis on 38.1 mm. Seega ei saa mõõta suuremaid auke kui pesa suurus. Nii väikest diameetrit kontrollitakse tootel ilma *tracker*'ita, näiteks nihikuga.



Joonis 3.4. Noole otsa flanšide mõõtmine kahe erineva meetodiga

3.2.3. Tulemused

Aukude diameetreid on võrreldud nominaaliga, mis on 33.00 mm. Nominaal on pandud paika pinkpuuris. Aukude omavaheliste kauguste erinevused nominaalist nelja punktilise koordinaatsüsteemi meetodi korral jäid vahemikku -0,28...0,13 mm, ühe punktilise meetodi korral jäävad punktivahelised kaugused vahemikku -0,26...-0,01 mm.

Aukude diameetrite erinevus nominaalist 4-punktilise meetodiga tuli 0,30...0,82 mm. See on põhjustatud osalt vertikaalasendis oleva objekti mõõtmisest, kus pesaga kuuli hoidmine on ebamugav.

Aukude diameetrite erinevus nominaalist 1-punktilise meetodiga tuli 1,81...1,88 mm. Nii väikest tulemuste kõikumist saab põhjendada sellega, et keraprisma hoidmine augus on kindel ja mugav mis tahes asendis. Siin ongi oluline pigem tulemuste väike varieerumine, mitte absoluutne nihe.

Suurem absoluutne erinevus on põhjustatud servade faasist (servad pole teravad, prisma asub sügaval, mistõttu diameeter suureneb), keskkohal on aga ikkagi õiges kohas. Kuid faasi kvaliteet ei ole väga oluline, kuna on vaja saada vaid ringide täpsed keskpunktid.

Seega ühe punkti meetod andis oluliselt väiksema kõikumise, mis teeb selle meetodi kasutamise väga soovitatavaks.

Tabel 3.2. Kauguste ja diameetrite erinevus nominaalist (33 mm) mõõdetuna ühe ja nelja punkti meetodiga (ühikud mm-tes)

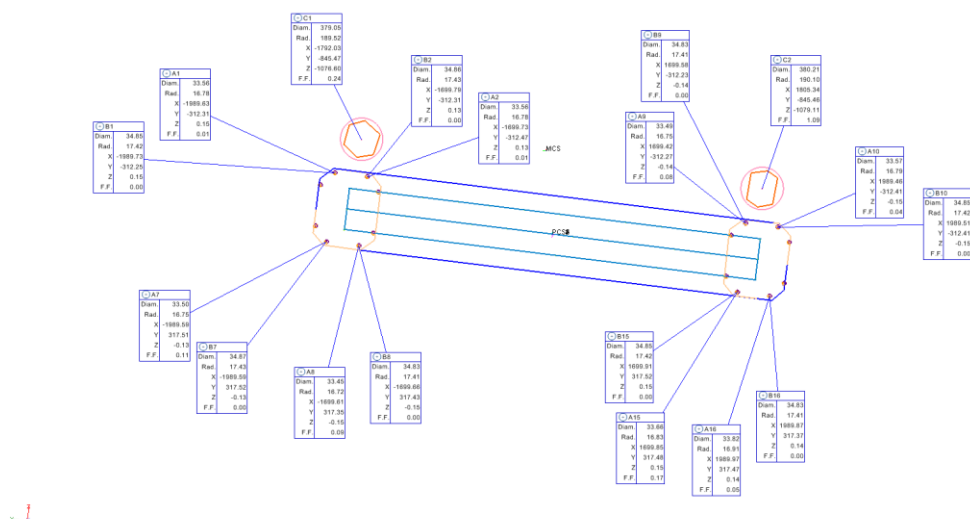
	L (4 punkti)	L (1 punkt)	D (4 punkti)	D (1 punkt)
	-0,28	-0,26	0,30	1,81
	-0,20	-0,23	0,35	1,82
	-0,19	-0,14	0,40	1,83
	-0,17	-0,12	0,45	1,83
	-0,12	-0,09	0,48	1,83
	-0,10	-0,08	0,49	1,83
	-0,07	-0,07	0,50	1,85
	-0,01	-0,07	0,56	1,85
	0,00	-0,06	0,56	1,85
	0,02	-0,05	0,56	1,85
	0,04	-0,05	0,57	1,86
	0,10	-0,05	0,58	1,86
	0,10	-0,04	0,59	1,86
	0,12	-0,04	0,60	1,87
	0,12	-0,02	0,66	1,87
	0,13	-0,01	0,82	1,88
Standarthälve	0,13272622	0,07051005	0,12379923	0,01990603

Kahe meetodi järgi loodud koordinaatsüsteemide täpsust on kontrollitud lisaks ka ümmarguste ülemiste flanšide abil (vaata joonis 3.4). Mõlemad flanšid on mõõdetud jälle nii nelja kui ühe punkti meetodiga. Nüüd võtsin kasutusele koordinaatsüsteemi, kus nivoopinnaks (Z) oli kahe flanši üldtasand ja aukude keskpunktidest tegin virtuaalsed punktid tarkvaras Metrolog X4. Nende vahele tõmbasin X-telje, mis andis võimaluse nähaka Y-koordinaate. Siis sain arvutada kontrollflanšide koordinaadid.

Koordinaatide erinevused kahe meetodi vahel ei ületa siin 0.1 mm (tabel 3.3). See erinevus on piisavalt väike tavalise montaaži jaoks (seal on aksepteeritud isegi 0.5 mm). Täpsema töötluse saab teha üksnes masindamise käigus.

Tabel 3.3. Nelja ja ühe punkti meetodi järgi loodud koordinaatsüsteemide kontroll flanšside abil. Väärtused mm-tes

	Meetod	4 punkti	1 punkt	
Flanš				Erinevus
	Diam.	379,05	379,05	
	X	-1792,03	-1792,05	0,02
1	Y	845,47	845,55	-0,08
	Z	1076,60	1076,60	0,00
	Diam.	380,21	380,21	
	X	1805,34	1805,32	0,02
2	Y	845,46	845,52	-0,06
	Z	1079,11	1079,11	0,00



Joonis 3.5. Aukude baasil (aukude ja flanšside koordinaatide põhjal) loodud koordinaatsüsteem programmis Metrolog X4

Seega saab ühe punkti meetodit edukalt kasutada, kuna koordinaatsüsteemide erinevus kahe meetodi vahel annab detailidele positsioonilise täpsuse parema kui 0,1 mm. Samuti on ühe punkti meetod vähemalt 4 korda kiirem nelja punkti meetodist. Eeliseks on veel ainult 1 mõõdistus augu kohta, rääkimata mugavusest. Reflektori hoidmine on palju mugavam, kuna see on fikseeritud asendis kindlalt augu sees. Ühe punkti meetodi piiranguks jääb siiski asjaolu, et mõõta saab ainult augu sees ja diameeter on piiratud põhireflektori diameetriga (38,1 mm).

3.3. *Tracker*'i soojenemise mõju tulemuste täpsusele

3.3.1. Meetodi kirjeldus

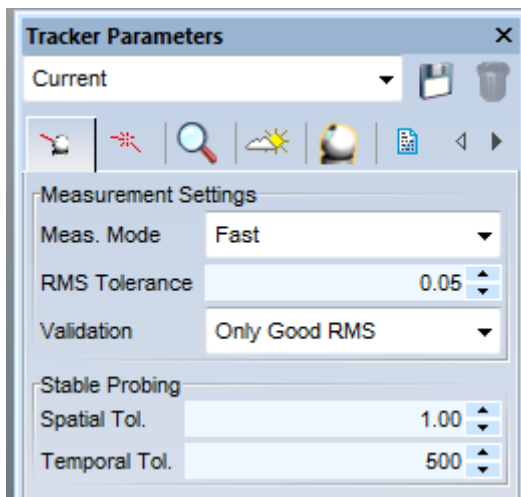
Erinevatel tootjatel on erinevused nõudmised instrumentide soojendamise jaoks. Näiteks Faro firma seadme korral on nõutud vähemalt poole tunnine soojendamise aeg. Leica seadme puhul lubab tootja, et aparati võib kasutada n-ö karbist võetuna, seega soojendamata. (Hexagon). Siiski on tehtud laboritingimustes ka uuringuid, kus oli näidatud täpsuse kasvu seos seadme soojendamisega (Gassner & Ruland 2010, Dvořáček 2016). Järgnevalt on uuritud täiendavalt soojendamise mõju tulemuste täpsusele.

Muidugi on külmas ruumis seadme soojenemise aeg pikem. *Tracker* seadmel on 4 kauguse mõõtmise režiimi: „outdoor“, „fast“, „standart“ ja „precise“. Viimasel kolmel on erinev mõõdistusaeg – $\frac{1}{2}$, 2 ja 5 sekundit. Aparaat mõõdab sekundi jooksul kaugust kuni 1000 korda. Tavaliselt mõõdistan „fast“ režiimiga, kuid masindatud toodete puhul olen kasutanud ka „standard“ režiimi. Tekib ka küsimus, kas mõni mõõterežiim on külmalt töötamisele tundlikum. Või kas pikema mõõterežiimi kasutamine asendab seadme soojendamist. Eesmärk on kontrollida, kas soojendusaeg mõjutab täpsust?

Mitmetel objektidel on suuremad lubatud tolerantsid ja aega vähem. Tsehhi tingimused kaugel labori omadest. Redelil seistes on prisma mugav hoida vaid pool sekundit mitte kaks või rohkem sekundit. Selles mõttes on lühema mõõteaja kasutamine palju sobivam.

3.4. Katse kirjeldus

Katse käigus on 5 reflektorite pesa paigutatud mitmele erinevale kaugusele aparadist (3–20 meetrit). Esimesed kaks pesa jäid töötluspingi tootealusele, ülejäänud pandi raamile. Mõõdistasin kõiki pesasid „fast“, „standart“ ja „precise“ režiimiga kolmel viisil – ilma soojenduseta, 30 minuti pärast ja kahe tunni pärast.



Joonis 3.6. *Tracker*'i parameetrid programmis Metrolog X4

Joonisel 3.5 näeme *tracker*'i mõõdistuse parameetreid. Mõõtmisrežiimid - "*outdoor*", "*fast*", "*standart*" ja "*precise*". Järgmine rida on maksimaalne lubatud KRV - vaikumisi 0,05 mm. Tavaliselt kasutan seda suurust, kui tegemist on kõrgtäpse masindatud detailiga. Tihti valin ka 0,08 - täpsusele see peaaegu ei i mõju, kuid töökiirus kasvab, sest väiksema lubatud KRV-ga rohkem mõõtmisi enamasti ei lastaläbi esimese korraga. Seda tingib käe värisemine, vibratsioon ja muud faktorid. Paar korda isegi panin KRV väärtuseks 0,12 mm, sest kaugus oli suhteliselt suur ja õhk oli tolmune. Mõõdetava toote tolerantsid seda ka lubasid. Ning viimaseks tuleb otsustada, mis mõõtmisi võetakse arvesse. Saab kas arvestada ja salvestada mõõdistused ainult KRV-ga, mis ei ületa lubatud piiri. Või ubatud KRV väärtuse ületamisel tuleb ekraanile hoiatus KRV väärtusega ja võimalusega teha muutusi või seda aktsepteerida. Või kõikide mõõdistude salvestamine, sõltumata nende KRV-st.

Probing Points (PCS1)							
Workpiece temperature	Temperature	Humidity	Pressure	RMS X	RMS Y	RMS Z	RMS total
	14.10	33.50	1017.020	0.03	0.04	0.01	0.05
	14.10	33.50	1017.020	0.03	0.04	0.00	0.04
	14.00	33.60	1016.950	0.05	0.06	0.01	0.08
	14.00	33.70	1017.010	0.02	0.03	0.02	0.05

Joonis 3.7. Mõõtmiste "toorandmed"

Joonisel 3.6 on mõned andmed neljapunktilise tasandi mõõtmisest. Olemas on X, Y, Z koordinaatide ja üldised KRV-d. Programm näitab ka ilmajaama andmed. Ilmajaam on sisseehitatud kontrollerrisse. Samuti on olemas võimalus samal ajal jälgida mõõdistava detaili temperatuuri. Selle jaoks on aparaadi komplektis olemas spetsiaalne kaabel, mille üks ots läheb kontrolleri pessa, teine ots metalliga asub mõõdistaval detailil. Joonisel on see veerg tühi, kuna puudub vajadus temperatuuri andmete järele.



Joonis 3.8. Instrument ning kontrollpunktid. Kontrollpunktid on magnetpesad

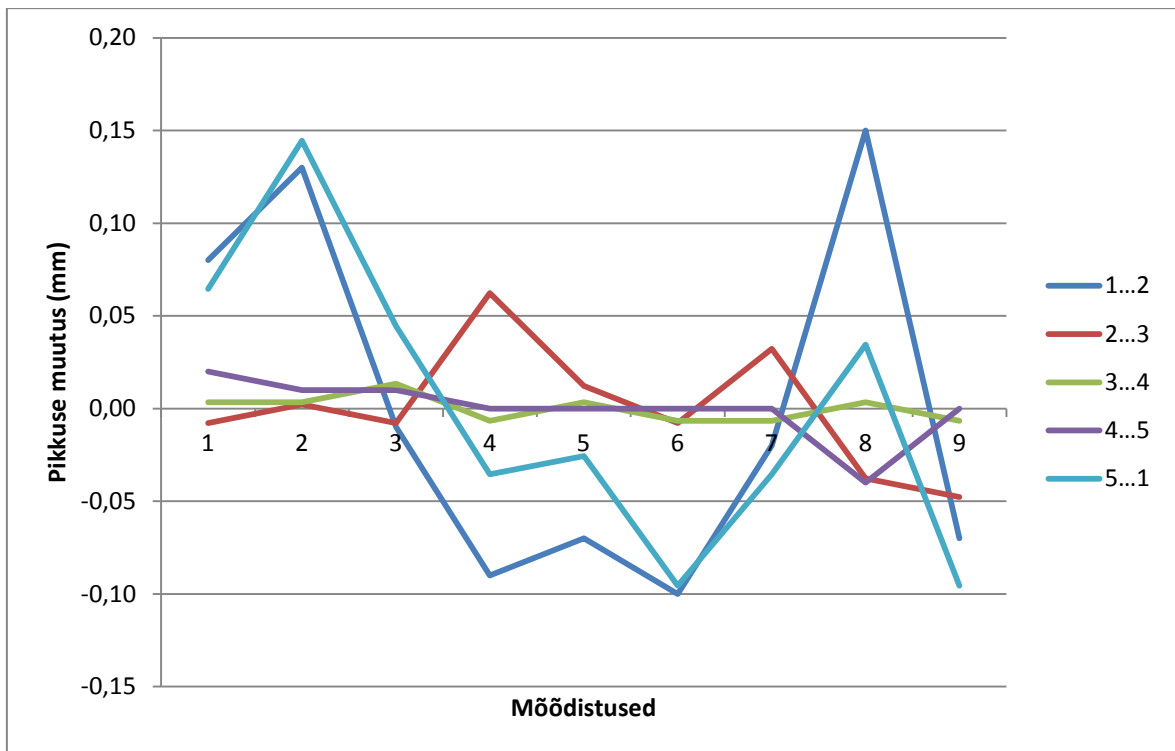
3.4.1. Tulemused

Kõigile mõõtepunktiledele on arvutatud koordinaadid ja nende järgi on arvutatud punktidevahelised kaugused. Tabel 3.4 toob tulemused. Võrreldud on punktidevahelisi kaugusi.

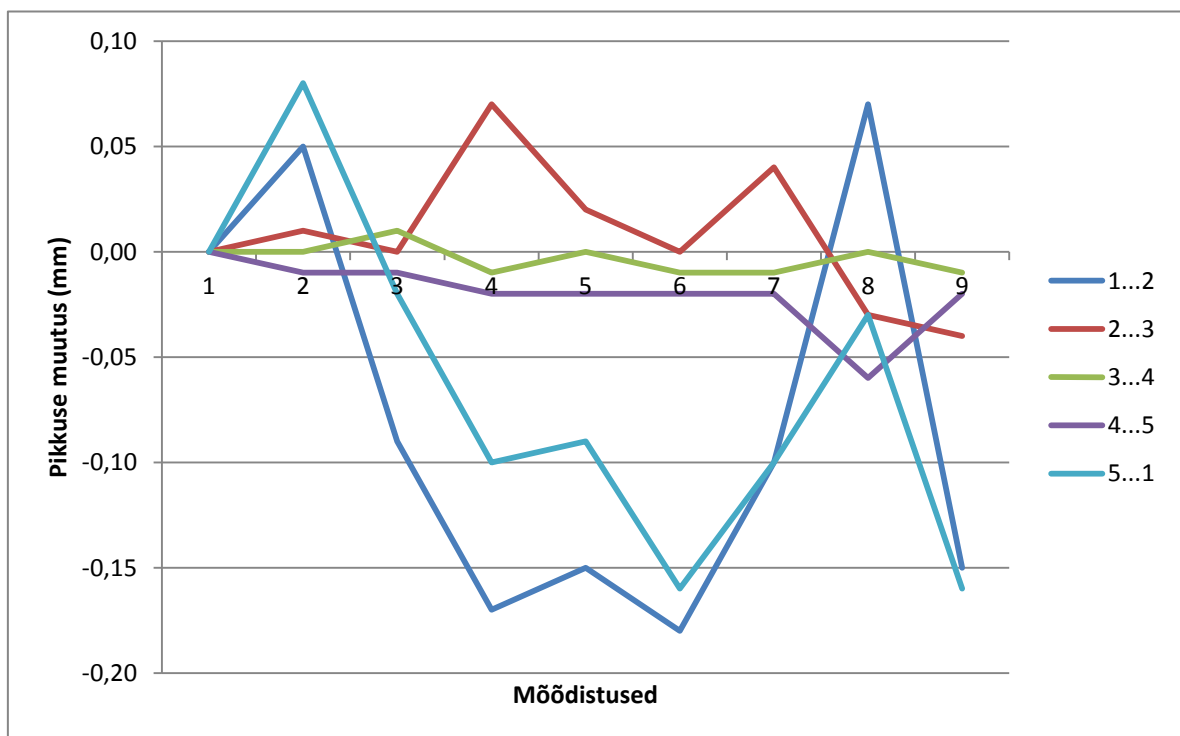
Tabelis 3.4 on toodud joonte pikkused (mm) on saadud erinevate mõõdistusrežiimiga- ja erinevate soojendusaegadega. Tabelist 3.4 on näha, et soojalt on kaugused natuke pikemad, kui külmalt. Samas on vahed väga väikesed, osalt tingituna seadme enda mõõtetäpsusest nende kauguste juures. Kõige täpsemaks tulemuseks võib pidada kahe tunni pärast soojalt tehtud mõõtmisi viie sekundilise mõõteajaga (eelviimane veerg). Seda saab kasutada kui referentsi. Siit nähtub, et punktidevahelised kaugused on soojalt 5 sekundiga mõõtes veidi suuremad, kui külmalt mõõtes, vahed ulatuvad kuni 0,2 mm-ni sõltuvalt mõõteajast. Joonel 1-2 tuleb kõige suurem vahe kahe sekundilise mõõteajaga külmalt mõõtes (0,2 mm). Tegemist on kaugustega üle 10 m. Selliste kauguste juures on tolerantsid praktikas lubatud aga sageli üle 1 mm, seega 5 sekundilise režiimiga külmalt mõõtmine ikkagi probleem ei ole. Sellise lubatud tolerantsi juures pole probleem ka lühem mõõteae.

Tabel 3.4. Joonte pikkused (mm) on saadud erinevate mõõdistusrežiimiga- ja erinevate soojendusaegadega

Mõõdistus	0 min			30 min			120 min			Keskmine
Joon	0.5'	2"	5"	0.5'	2"	5"	0.5'	2"	5"	L
1...2	11648,38	11648,33	11648,47	11648,55	11648,53	11648,56	11648,48	11648,31	11648,53	11648,45
2...3	6117,80	6117,79	6117,80	6117,73	6117,78	6117,80	6117,76	6117,83	6117,84	6117,79
3...4	3004,99	3004,99	3004,98	3005,00	3004,99	3005,00	3005,00	3004,99	3005,00	3004,99
4...5	2834,40	2834,41	2834,41	2834,42	2834,42	2834,42	2834,42	2834,46	2834,42	2834,42
5...1	17399,36	17399,28	17399,38	17399,46	17399,45	17399,52	17399,46	17399,39	17399,52	17399,41



Joonis 3.9. Erinevates režiimides saadud punktidevahelised jooned ja nende pikkuste erinevused võrreldes keskmise pikkusega



Joonis 3.10. Erinevates režiimides moodustatud punktidevahelised jooned ja nende pikkuste erinevused võrreldes esimese mõõdistusega

Ka joonistelt 3.6 ja 3.7 näeme, et kõige suurem kõikumine oli pikematel joontel – kuni 0,18 mm 5 sekundilise mõõteaega. Lühem mõõteaeg andis 17 meetrise joone puhul maksimaalselt erinevuse 0,24 mm. Tavaliselt on suurtel objektidel (10–20 m) selline viga ikkagi tolerantside piires.

Lühikeste joonte pikkuse muutus oli minimaalne – kuni 0,02 mm.. Tabelist 3.4 näeme, et lühikeste joonte puhul ei mängi rolli ka mõõteaeg.

Seega enamuse tavatööde jaoks suurtel objektidel saab kasutada seadet ilma soojenduseta ja isegi „*fast*“ režiimis. See ei tekita jämedat hälvet, vaid erinevused jäid alla 0,3 mm. Instrumendi kaugus mõõturi kiirus on 1000 mõõdistust sekundis, seega poole sekundiga teostakse ikkagi 500 mõõtmist.

Masindatud objektide mõõdistamisel, kus on nõutud tolerantsid alla 0,1 mm, on stabiilsuse jaoks siiski vajalik soojendada aparaati kuni 30 minutit ja vähendada lubatud mõõtmiste KRV 0,08 mm-lt 0,05 mm-ni.

3.5. Trackeri eelneva orientatsiooni kasutamine järgmisel päeval

3.5.1. Probleemi ja meetodi kirjeldus

Iga töö juures tuleb viia läbi orienteerimine, ehk koordinaatsüsteemi saamine. Tavaliselt tehakse seda enne igat tööd uuesti. Samas on see aeganõudev protsess. Vahel juhtub, et ühel päeval alustatud tööd tuleb teisel päeval jätkata. Võimalik on ka *tracker* jätta tööasendisse. Mõõtmised toimuvad ju tsehhis, varastamise ohtu niivõrd pole. Tekib küsimus, kas eelmise päeva orienteerimise (koordinaatsüsteemi loomise) tulemused on kasutatavad järgmisel päeval. Või toob see kaasa täpsuse langemise. Eesmärk on säästa aega selle pealt, et ei looda uut orienteerimist, mis tingib objekti osade uuesti mõõtmise, vaid kasutatakse eelmise päeva koordinaatsüsteemi. See on võimalik ka seetõttu, et mõne lisandunud detaili või töötluse mõõdistamiseks pole vaja mõõdistada kogu objekti uuesti. Kui ühel päeval on mõõdistatud objekti detailid, ja nende järgi on loodud koordinaatsüsteem, siis järgmine kord saab jätta see samm vahele. Selle asemel võib orienteerida kleebitud punktide järgi, , teha kohe initialsatsioon ja orienteerimine. Nüüd saab kohe mõõdistada uut detaili. Nii kasutame tööaega efektiivsemalt, teades, et mõõdistust saab jätkata poolelijäänud kohast.

Seadme komplektis on olemas 13 pesa, mida saab kasutada kindelpunktidenä. Neist 5 on mobiilsed, tugevama neodüümmagnetiga põhjas. Nnõrgema magnetiga pesad on reflektori jaoks. Ülejäänud kaheksat pesa saab kasutada n-õ statsionaarsete punktidenä. Nendel on olemas ainult prisma magnet ja neid saab kinnitada liimi abil siledale pinnale.



Joonis 3.11. Neodüümmagnetiga ja kleebitav reflektoripesa

Pesade tööprintsip on väga lihtne – pesa läheb 1,5-tolline reflektor, mis on 0-konstandiga. Selle tulemusena mõõdetakse punkt prisma keskkohas. Et pesa süvend on tehtud täpselt reflektori jaoks, siis jääb prisma keskkohat ühte ja samasse kohta sõltumata suunast.

Orienteerimine toimub kasutades *free station* ehk vastulõike meetodit. Võrreldes tahhümeetri orienteerimisega ei saa kasutada täisvõtet, kuna tarkvara ei luba. Samuti ei saa teha ka rippuvaid käike. Minimaalne orienteerimispunktide arv on kolm. Tavaliselt kasutatakse nelja orienteerimispunkti. Lisapunktid on siiski kasulikud, kuna mõni pesa võib töö ajal nihkuda või ummistuda. Kui objekt on suur, siis kasutatakse sageli lausa viite lähtepunkti, sest järgmistest jaamadest võin näha ainult 3–4 punkti (mõned punkti võivad jääda varju). Tarkvara orienteerimisaken on näha joonisel 3.9. Orienteerimise ülesanded on järgmised:

- arvutada jaama orientatsioon kooskõlas teiste jaamadega;
- määrata jaamade positsioonid kooskõlas referentsjaamaga;

- liigutada kõik objektid ja paigutused vastavalt uuele arvutusele;
- visualiseerida jooksev positsioon ja kõikide jaamade orientatsioonimeetod töö sessioonis.

Nupp „linnukestega“ valib kõik kindelpunktid. „Võlupulk“ aitab koostada ja valida sobivad orientatsioonipaarid. Nupp kalkulaatoriga arvutab uue orientatsiooni ning luup näitab jaamade asukohti. Järgmisena on näha orientatsiooni tulemused, mis on esitatud iga paari kohta: X, Y, Z koordinaate parima sobiva punkti orientatsiooni arvutamiseks;

- punktihälve – kaugus parima sobiva ja viimasena mõõdetud punkti vahel;
- RMSi (keskmine ruutviga) viimati mõõdetud punktidelt selles grupis (rida suurema KRVga näidatud sinisega);
- vaatlusnurk – suurim kahe vaatluste vahel mõõdetud nurk erinevatest jaamadest orienteerimisel.

Siis on arvutatud ja kuvatud RMS ja dispersiooni tegurid (Variance Factor). Tavaliselt saan KRV vahemikus 0–0,05 mm. Kui pesas on metallpuru, siis võib KRV olla kuni 0,1 mm. Kui see on suurem, siis puhastan pesad või kustutan veaallikana esineva punkti arvutusest. Dispersiooni tegur on tavaliselt piirides 0,5–1,5, sõltuvalt kindelpunktide arvust ja geomeetriast. Kui on olemas 4–5 head punkti, siis on dispersiooni tegur 0,5–0,6 mm. Dispersioonitegur on arvutatud järgmise valemi järgi:

$$\frac{\sum_{i=1}^N \frac{v_i^2}{\sigma^2}}{r}, \quad (3.1.)$$

kus N on orientatsioonipunktide valimi arv;

v_i – hälve orientatsioonipunkti ja mõõdetud punkti vahel;

σ – standardhälve;

r – mõõtmiste üleliigsus (lisavalimi arv võetud orientatsiooni arvutamiseks, lisaks nõutud miinimumile, miinimum $n - 3$ punkti)

Viimases kastis on toodud tulemused igale jaamale:

- X, Y, Z – positsioonid
- RotX, RotY, RotZ –telgede kalded
- Suhe referentsjaamaga

- Skaleerimistegur (mõõtkava tegur) võib olla automaatne või manuaalne, referentsjaama mõõtkava tegur on 1.

Arvutamise käigus võib saada ka veateateid nagu „RMS is too high“ (põhjuseks võib olla valed punktide paarid, liigutatud pesa) ja „Unable to orient station“ (põhjuseks võib olla vähem kui 3 punkti referentsjaamal või jaamade vahel).

Orient Stations

Orientation Parameters

☐ Based on Nominal

Orientation	ST1(Ref.)	ST2	ST3	ST4
<input checked="" type="checkbox"/> OP1	<input checked="" type="checkbox"/> PNT1	<input checked="" type="checkbox"/> PNT11	<input checked="" type="checkbox"/> PNT21	<input checked="" type="checkbox"/> PNT31
<input checked="" type="checkbox"/> OP2	<input checked="" type="checkbox"/> PNT2	<input checked="" type="checkbox"/> PNT12	<input checked="" type="checkbox"/> PNT22	<input checked="" type="checkbox"/> PNT32
<input checked="" type="checkbox"/> OP3	<input checked="" type="checkbox"/> PNT3	<input checked="" type="checkbox"/> PNT13	<input checked="" type="checkbox"/> PNT23	<input checked="" type="checkbox"/> PNT33
<input checked="" type="checkbox"/> OP4	<input checked="" type="checkbox"/> PNT4	<input checked="" type="checkbox"/> PNT14	<input checked="" type="checkbox"/> PNT24	<input checked="" type="checkbox"/> PNT34
<input checked="" type="checkbox"/> OP5	<input checked="" type="checkbox"/> PNT5	<input checked="" type="checkbox"/> PNT15	<input checked="" type="checkbox"/> PNT25	<input checked="" type="checkbox"/> PNT35

Result orientation

Orientation	RMS	Pointing Error	Apex Angle	X	Y	Z	Farthest Point
OP1	0.03	0.05	96.054	-2890.89	-1613.43	183.00	PNT11
OP2	0.03	0.04	92.186	-4434.82	-1070.95	184.88	PNT12
OP3	0.03	0.04	79.172	-2587.98	4099.88	185.51	PNT3
OP4	0.05	0.06	81.721	-1063.45	3567.35	183.81	PNT14
OP5	0.04	0.05	116.299	-1582.55	6023.78	934.43	PNT15

RMS: 0.03 Variance Factor: 0.576873

☐ Prompt during execution

Result station

Station	Orientation Mode	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz	Scale
ST1	Oriented	0.00	0.00	0.00	-0.000	-0.000	-0.000	1.000000
ST2	Oriented	-284.25	7502.82	46.26	-0.001	0.000	-95.524	1.000009
ST3	Oriented	-5213.50	1653.21	-36.52	0.000	0.003	-29.730	1.000013
ST4	Oriented	-4420.08	-3790.12	-52.23	-0.001	-0.003	-178.173	1.000005

OK Cancel

Joonis 3.12. Orienteerimisaken tarkvaras Metrolog X4

Toitekonveier on üks näide objektist, kus tuleks kasutada kleebitud kindelpunkte, kuna sellel teostatakse mitu mõõdistust. Iga konveieri mõõdistus võtab umbes kaks tundi. Nendes vähemalt pool tundi võtab koordinaatüsteemi elementide mõõdistus ning koordinaatüsteemi loomine ja kontroll arvutis. On vaja mõõdistada umbes 11 punkti. Töö käigus tuleb ronida konveieri sees ja liigutada segavaid objekte (näiteks platvorm). Siin võiks olla kasulik kasutada kogu töö ulatuses samu orienteerimispunkte. Kindelpunktide mõõtmine ja orienteerimine tulemuste kontrolliga võtab kindlasti alla 10 minutt.

Kokkuvõtteks saab öelda, et:

- objekti tolerantsid on suured, tipptäpsust ei oodata;
- objekt on suur ehk püsiv. Seda ei liiguta ka kraanaga, kuna puudub vajadus ning kaal on väga suur. SSellega ei tegele töötajad, vaid troppijate brigaad;
- samade kindelpunktide kasutamine võib vähendada iga mõõdistusoperatsiooni aega kahekordselt. Puudub vajadus mõõdistada koordinaatsüsteemi elemente, võib kohe tegeleda koonusega ja flanšiga.



Joonis 3.13. Mõõdistus. Pesad kleebitud metallribadele seintel

Kleepisin pesad metallribadele betoonpostidel. Igal postil oli 2 punkti – 1 orienteerimiseks, teine mõõdistamiseks. Punktidevaheline kaugus tuli umbes 12 ja 17 meetrit. Esmaspäeval mõõdistasin ära kõik need 8 punkti. Teisipäeval orienteerisin aparadi ja mõõdistasin neli punkti. Veel ühe orienteerimise ja kontrollmõõdistuse tegin järgmisel esmaspäeval.

Tabel 3.5. Mõõdetud koordinaatide ja kauguste erinevused järgmisel päeval ja 7 päeva pärast kasutades samu kindelpunkte

Punkti nr.	Väärtus	Erinevus (mm)	
		Pluss 1 päev	Pluss 7 päeva
1	X	0,35	-0,01
	Y	0,15	0,05
	Z	0,02	0,00
1...2	L	0,11	-0,04
2	X	0,19	0,01
	Y	-0,03	-0,05
	Z	0,03	-0,08
2...3	L	0,00	0,07
3	X	0,01	-0,06
	Y	0,08	0,08
	Z	0,07	-0,03
3...4	L	-0,06	0,07
4	X	-0,03	-0,01
	Y	0,15	0,01
	Z	-0,06	-0,02
4...1	L	-0,23	-0,04
1	X	0,35	-0,01
	Y	0,15	0,05
	Z	0,02	0,00

Tabelist 3.5 näeme, et kauguste erinevused tulid väikesed. Konveieri jaoks sobib täpsus 1 mm, suurim erinevus oli 0,35 mm (põhjuseks on aparadi mõõdistushälve ja kiire mittesoodne sisenemisnurk), 0,35 mm jääb siiski lubatud piiridesse. Suurima täpsusega tooted tavaliselt masindatakse, mistõttu nad lähevad korra teise tsehi. Seetõttu masindatud objekte kõrgeima täpsusega mõõdistada samas koordinaatsüsteemis nagunii ei saa. Nagunii tuleb hiljem mõõdistada uuesti, sest toode läheb koostamistsehhist sisetreippingile.

Seega, vana koordinaatsüsteem sobib kasutamiseks, kui lubatud vead on suuremad. Järeldusena saab öelda, et kleebitavaid pesi saab kasutada, kui ehitatakse suur, näiteks rohkem kui 5x5-meetrise mõõtmetega metallkonstruktsioon.

Kindelpunktide pesi on parem kleepida betoonile, sest pesade asukohale võib mõjuda ööpäevane temperatuurimuutus.

Väikeste objektide puhul see meetod ei sobi – lubatud tolerantsid on väikesed ja objekt võib muutuda keevituse või koostamise ajal. Suurtele objektidele aga sobib vana koordinaatsüsteemi kasutamine küll. Näiteks konveieri puhul saab teha iga operatsiooni 2 korda kiiremini, kuna koordinaatsüsteemi loomist pole vaja korrata. Alati oleks hea mõõdistada lisaks mõned kontrollpunktid tootel, näiteks mingit auku 1 punkti meetodiga, et veenduda, kas objekti põhiosa on püsivalt omal kohal.

4. KOKKUVÕTE

Laser tracker on Eestis senini uus ja vähetuntud instrument. Seade asendab seniseid traditsionaalseid mõõtmismeetodeid, pakkudes palju suuremat efektiivsust. Kuna varem on olnud kogemus elektrontahhümeetriga, oli *tracker*'i meetodite omandamine kergem. Erinevused on siiski küllalt suured, eeskätt koordinaatsüsteemi loomise osas. *Tracker* kasutab kohalikku, detailipõhist koordinaatsüsteemi. Antud töös on uuritud aparaadi omadusi, konkureerivaid seadmeid, mõõdistusprintsippe ja tarkvara, testitud on keskkonnamõju seadmele ja erinevaid mõõtmismeetodeid. On tutvustatud *tracker*'i tarkvara Metrolog X4 ja selle arvutusmeetodeid.

Igapäevaste tööde käigus on tekkinud ka küsimusi ja probleeme. Töös on tutvustatud mitmeid reaalseid mõõteobjekte. Nendest kasvas välja ka magistritöö eesmärk, mis on uurida *tracker*'i mõõtmistäpsust muutuvates töökeskkonna tingimustes keset tööstuslikku tootmist ja moodsamate mõõtmismeetodite mõju tulemuse täpsusele. *Tracker*'i uuringuid laboritingimustes leidub, kuid reaalsetes töötingimustes katseid on vähem. Töös on toodud katsed reaalsetes töötingimustes, on uuritud ka selliseid objekte, mida on tulnud mõõta reaalsete tellimuste käigus. Just meie talvised temperatuurierinevused tekitavad uusi väljakutseid, näiteks statiivi ja seadme kiire temperatuurimuutus. Lisaks keskkonnamõjude analüüsile on püütud leida võimalusi mõõdistuskiiruse tõstmiseks moodsamate mõõtmismeetodite kaudu. Eriti efektiivseks osutus koordinaatsüsteemi loomine 1 punkti meetodiga 4 punkti meetodi asemel.

Uuringutes on kasutatud Leica *tracker* seadet AT401, mis on kasutusel firmas. Sellel seadmel on mitmeid eeliseid Faro *tracker*'ite ees. Eriti peab rõhutama asjaolu, et vertikaalnurga mõõteulatus on suurem, mis annab eelise metallkonstruktsioonide mõõtmisel.

Esmalt on uuritud temperatuurimuutuse mõju alumiiniumist statiivile. Tegemist on nn standardstatiiviga, mis antakse tootja poolt kaasa. Selgus, et temperatuurimuutus mõjutab alumiiniumstatiivi kõrgust ja selle kaudu objekti koordinaate. Nii statiivi kõrgus kui ka objektide punktide Z-koordinaadid muutuvad kahe tunniga 0,3 mm võrra, esimese poole tunni jooksul 0,2 mm. Seda tuleb arvestada kõrgtäpsete tööde tegemisel. Et vältida temperatuuri mõju, on otstarbekas jätta statiiv eelnevalt tsehhi, nii et töö alguseks oleks saavutatud töökeskkonna temperatuur.

Samuti on uuritud väikeste, kuni 1,5-tolliste aukude uut mõõdistusmeetodit. Eesmärk oli asendada aeganõudev 4 punkti meetod uuema ja efektiivsema 1 punkti meetodiga. Selgus, et väikeste aukude mõõdistamine 1 punkti meetodiga on väga efektiivne. See on piisava täpsusega, mugav ja vähemalt 4 korda kiirem. Kahe meetodi järgi olid loodud koordinaatsüsteemid. Nende põhjal ei ületa samade detailide koordinaatide erinevus 0,1 mm. Olen seda juba kasutanud tööobjektidel, näiteks BOP Skidil. Mõõdetavad augud olid antud juhul toote all, mispuhul tavalise 4 punkti meetodiga mõõdistamine oleks olnud väga väsitav.

On uuritud, kuidas mõjub *tracker*'i enda soojendusaege töö tulemustele. Selgus, et kui pole tegemist väga kõrgetäpsuse mõõdistusega, on „karbist“, ilma soojendamiseta mõõdistamine isegi sobiv. Soojeneva instrumendi hõlbed vähenevad soojenemise käigus, kuid väga vähe – alla 0,1 mm. Suuremad hõlbed – kuni 0,18 mm – on näha pikemate joonte (10–20 m) korral. Aga suurte objektide tolerantsid on ka suuremad. Samuti selgus, et kiirem mõõtmisaeg annab piisava täpsuse. Olles ebamugavas asendis, vibratsioonidega keskkonnas ja näiteks kõrgel, on pikem mõõdistusaeg väsitav. Hoida prisma liikumatuna 2 või 5 sekundit on tunduvalt ebamugavam kui 0,5 sekundit.

Siiski selgus, et eriti kõrgetäpsuse objektide korral, nagu masindatud objektide mõõdistamine (näiteks Siemens Base Frame), tuleb teha seadmele kuni 30 minutit soojendust. Põhjus on selles, et siin on nõutud tolerantsid alla 0,1 mm. Otstarbekas on alandada apriori lubatud mõõtmiste KRV 0,08 mm-st 0,05 mm-ni.

Tracker'i seisupunktide vahetus ja uue koordinaatsüsteemi loomine on aeglasem kui tahhümeetril. Seetõttu on analüüsitud ka eelneva orientatsiooni kasutamist järgmisel päeval, et vältida koordinaatsüsteemi uuesti sissemõõtmist. On uuritud, kas saab jätta mõõdistused pooleli ning jätkata samas koordinaatsüsteemis näiteks päev hiljem. Selgus, et madalama täpsusnõudega objektide korral on see täiesti võimalik. Mõõtmised erinesid vaid kuni 0,35 mm võrra. Veel selgus, et lisaks magnetiga kindelpunktidele saab kasutada ka kleebitavaid kindelpunkte. Neid saab kasutada rohkem kui ühel mõõdistusel. Isegi nädala pärast saab nende järgi orienteerida instrumenti nii, et täpsus jääb lubatud piiridesse. Edaspidi saab hakata kasutama kleebitavaid pesi ka ühekordse töö jaoks kohtades, kus ei ole tugevaid metallpindu magnetpesade jaoks.

Antud töö aitab aktiivselt juurutada *laser tracker* tehnoloogiat Eestis, olles kasulik ka teiste artiklite ja lõputööde jaoks. Edasist uurimist vajaks veel Leica *tracker*'i uuema generatsiooni mudel AT402, mida on täiustatud portatiivse katsli kasutamise võimalustega, ning kõige uuem – AT403, mille puhul lubab tootja täpsust ka negatiivsete temperatuuride – kuni -15°C korral.

5. SUMMARY

The Laser tracker is a new and still little known tool in Estonia. The device replaces the existing so far traditional methods of measurement, offering much higher efficiencies. Mastering the tracker was made easier due to the previous experience with the total station. The differences, however, are still quite large, primarily in terms of the creation of the coordinate system. The tracker uses a local product-based coordinate system. In this Master's thesis I studied the particular device, as well as competing devices, measuring principles and the software, and tested the influence of the environment different measuring methods on the device. I have also familiarized myself with the Metrolog X4 measuring software and its calculation methods.

During the course of the daily work there aroused questions and concerns, which defined the aim of the Master's thesis, which is to explore the accuracy of the tracker in the changing working environment and the impact of new measurement methods on the accuracy of the result. There are studies in laboratory conditions, but very little testing has been done in the real production conditions. Our winter temperature drops posed new challenges, such as the change in the temperature of the device and the tripod. In the Master's thesis examples of tests in real working conditions have been studied including those objects that had been measured by during the course of normal work. In addition to the analysis of the influence from the environment, I tried to find ways to improve the speed of measurements using modern measuring methods. Particularly effective was the creation of a coordinate system using the method of "one point" instead of the "four points".

The research was conducted with a Leica AT401 tracker that is used in the enterprise. This device have numerous advantages over Faro trackers. Particularly noteworthy is the fact that the range of measuring vertical angles is larger, which excels in the measurements of metal structures.

First and foremost, the influence of temperature change on the aluminum tripod was studied. It is a standard tripod connector kitted with the tool. It turned out that the change in temperature affect the height of the tripod, and, accordingly, on the coordinates of the object. The height of the tripod, as well as the Z coordinates of the object changed by 0,3 mm within two hours, and by 0,2 mm during the first half an hour. In order to avoid the

influence of the temperature it is more rational to leave the tripod in the production site in advance, so it would have reached the ambient temperature by the beginning of work.

I have also researched a new method for measuring small, up to 1,5 inches, holes. The goal was to replace the time-consuming method of "four points" with a new and more efficient method of "one point". It turned out that the small holes measuring method of "one point" is very effective. It is quite accurate, convenient and at least four times faster. Based on the measuring data I created two coordinate systems. The difference in these two systems does not exceed 0,1 mm. I have managed to apply this method in practice, for example measuring BOP Skid. Holes were measured on the underside of the product, which in the case of the usual "four points" method would have made the measuring process especially tedious.

I researched the effect of warming up the tracker on the measuring results. It became clear that if we are not talking about precision measurements, measurements without warming up, literally "out of the box, is permissible. The deviations of a warming tool reduce in the process of warming up, but only slightly - less than 0,1 mm. Large deviations up to 0,18 mm appear in the case of long, 10-20 m, distances. However, large object have larger tolerances. It also turned out that a shorter measuring time gives sufficient accuracy. Holding the reflector for 2 or 5 seconds is much less convenient than for 0,5 seconds.

However, still, it turned out that when measuring objects with very small tolerances, for example, when measuring objects after machining (example - Siemens Base Frame), the devices should be warmed up for at least 30 minutes. The reason is small, up to 0,1 mm tolerance. It is advisable to downgrade the default RMS of measurements from 0,08 mm to 0,05 mm.

The changing of stations and creating new coordinate systems using the tracker is slower than that when measuring using a total station. Therefore, I analysed the possibility of using the same orientation in the coming days to avoid additional measuring to create a new coordinate system. I researched if it was possible to interrupt the measurement process and continue working in the same coordinate system the next day. It turned out that it is entirely possible for objects with lower accuracy requirements. The differences in measurements did not exceed 0,35 mm. it was also revealed that in addition to the magnetic orientation nests, stick-on nests can also be used. They can be used for more than

one measuring. Even after a week time they can be used to orient the instrument so that the accuracy is within valid limits. In the future the stick-on nests can be used for single works in places where there are no still metal surfaces for magnetic nests present.

This Master's thesis will help the active introduction of laser tracker in Estonia, and will also be useful for other scholarly articles and dissertations. Further study is required on the next-generation AT402 model with the possibility of using a handheld probe and also the newest AT403 which, as promised, is capable of working in negative, up to -15°C temperatures.

6. KASUTATUD KIRJANDUS

Leica Absolute Tracker AT401 White Paper (2010)

[http://www.swisstek.com/images/wild_leica/Leica_Absolute_Tracker_AT401_white_paper.pdf] (10.11.2016)

[http://metrology.leica-geosystems.com/en/Leica-Scanning-Solutions_105432.htm] (03.03.2017)

Grishanov V.N., Oinonen A.A. (2012) UP-TO DATE LASER MEASURING SYSTEMS IN

THE PRODUCTION CYCLE IN SPACE TECHNIQUE, Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета

[<http://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-lazernye-izmeritelnye-sistemy-v-proizvodstvennom-tsikle-kosmicheskoy-tehniki>] (15.02.2017)

Dvořáček, Filipp (2014) System Software Testing of Laser Tracker Leica AT401, Czech Technical University in Prague

[<https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/gi/article/view/gi.14.2.2/3154>] (22.02.2017)

FARO Laser Tracker [<http://www.faro.com/en-us/products/metrology/faro-laser-tracker/overview>] (01.03.2017)

[http://w3.leicageosystems.com/downloads123/m1/metrology/general/brochures/Hexagon-MI-Leica-Absolute-Tracker-AT403-Brochure-EN_en.pdf] (03.03.2017)

[http://metrology.leica-geosystems.com/downloads123/m1/metrology/general/brochures/Leica%20Probing%20Solutions%20Brochure_en.pdf] (03.03.2017)

(2012) Leica AT401 User Manual (2012) lk 40-42, 48-52.

(2012) Tracker Pilot User Manual (2012)) lk 4,5.

[<http://extranet.metrologic.fr/Support/FAQ/FAQView/tabid/199/ArticleId/107/language/en-US/Least-Square-and-Tchebychev-features-computation.aspx>] (05.01.2017)

[<http://extranet.metrologic.fr/Support/FAQ/FAQView/tabid/199/ArticleId/412/language/en-US/How-are-feature-compensated.aspx>] (05.01.2017)

Gassner G., Ruland R. (2011) SLAC, Stanford, CA 94309, U.S.A.

[<http://www.slac.stanford.edu/cgi-wrap/getdoc/slac-pub-14300.pdf>] (12.11.2016)

Dvořáček, Filipp (2016) LABORATORY TESTING OF LEICA AT401 LASER TRACKER, Czech Technical University in Prague

[https://www.researchgate.net/publication/302916072_LABORATORY_TESTING_OF_LEICA_AT401_LASER_TRACKER] (14.11.2016)

(2017) Metrolog X4 V7GA kasutusjuhend

PML Expertise and Collaborations Lead to Portable Test Solution for Laser Trackers (2015)

[<https://www.nist.gov/news-events/news/2015/12/pml-expertise-and-collaborations-lead-portable-test-solution-laser-trackers>] (14.11.2016)

Laser Tracker Systems (2017) [http://www.leica-geosystems.us/en/Laser-Tracker-Systems_69045.htm] (14.11.2016)

Kyle S., Loser R., Warren D. & Leica (1997) Automated part positioning with the laser tracker [<http://www.slac.stanford.edu/econf/C971013/papers/035.PDF>] (15.11.2016)

Petrov, V (2015) .Сравнение характеристик лазерных трекеров Leica AT402 и Faro Vantage. [www.promgeo.com] lk 3, 4, 11. (02.12.2016)

[http://metrology.leica-geosystems.com/thumbs/originals/LKER_2364.jpg] (02.01.2017)

[http://res.cloudinary.com/engineering-com/image/upload/w_640,h_640,c_limit/Laser_Tracker_Banner_en79io.jpg] (02.03.2017)

[http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/5623-3936803.jpg] (01.03.2017)

[http://www.koda.ua/images/db/979_1087.png] (02.12.2016)

[http://www.leicageosystems.es/downloads123/m1/metrology/AT401/brochures/Leica%20Absolute%20Tracker%20AT401_en.pdf] (20.12.2016)

[<http://www.lasersafetyfacts.com/laserclasses.html>] (20.12.2016)

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks
ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Timur Sagitov, (sünniaeg 19/06/89 38906192225),

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö

**KESKKONNATINGIMUSTE JA TÖÖMEETODITE MÕJU LEICA LASER
TRACKER AT401 TÄPSUSELE (THE IMPACT OF ENVIRONMENTAL
CHANGES AND MEASURING METHODS ON THE ACCURACY OF THE
LASER TRACKER LEICA AT401),**

mille juhendaja on dotsent Harli Jürgenson PhD,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(allkiri)

Tartu, _____
(kuupäev)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)